



TITLE:

環境騒音暴露によるTTSの推定方法に関する基礎的研究(
Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

伊藤, 昭好

CITATION:

伊藤, 昭好. 環境騒音暴露によるTTSの推定方法に関する基礎的研究. 京都大学, 1989, 工学博士

ISSUE DATE:

1989-01-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r6758>

RIGHT:

環境騒音暴露による T T S の 推定方法に関する基礎的研究

1988 年

伊 藤 昭 好

目 次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	2
1.2 TTSの推定方法に関する従来の研究	2
1.2.1 定常騒音暴露によるTTS	2
1.2.2 非定常騒音暴露によるTTSの推定方法	6
1.2.3 長時間騒音暴露によるTTS	9
1.3 研究の目的と概要	11
参考文献	13
第2章 騒音暴露実験に影響を及ぼす因子に関する検討	17
2.1 はじめに	17
2.2 騒音暴露を行う音場の差が実験結果に及ぼす影響に関する検討	18
2.2.1 音場測定	18
2.2.1.1 装置	19
2.2.1.2 実験手順	19
2.2.1.3 実験結果及び考察	21
2.2.2 騒音暴露実験	27
2.2.2.1 被験者	27
2.2.2.2 装置	27
2.2.2.3 実験手順	28
2.2.2.4 実験結果及び考察	30
2.3 非騒音暴露時における聴力域値の変動に関する検討	37
2.3.1 被験者	37
2.3.2 装置及び実験手順	37
2.3.3 実験結果及び考察	38
2.4 結論	42
参考文献	43
第3章 24時間白色騒音暴露によるTTSの実験的研究	45
3.1 はじめに	45
3.2 実験方法	45
3.2.1 被験者	45
3.2.2 実験手順	47
3.2.2.1 暴露方法	47
3.2.2.2 域値の測定	50
3.2.3 対照実験	50

3.3 実験結果	51
3.3.1 対照実験	51
3.3.2 TTSの増大	51
3.3.3 漸近域値移動 (ATS)	55
3.4 考察	57
3.4.1 TTSの増大	57
3.4.2 ATSと暴露レベルとの関係	57
3.4.3 山本・高木らのTTSの増大の式との比較	58
3.5 結論	60
参考文献	61
第4章 低レベル長時間騒音暴露にまで適用可能なTTSの実験式の検討	63
4.1 はじめに	63
4.2 暴露時間とTTSの増大に関する検討	65
4.2.1 検討の対象とした実験データ	65
4.2.2 検討した関数形	65
4.2.3 結果及び考察	66
4.3 暴露レベルとTTSの増大に関する検討	72
4.3.1 検討の対象とした実験データ	72
4.3.2 検討した関数形	73
4.3.3 結果及び考察	73
4.4 TTSの増大の式	76
4.4.1 検討の対象とした実験データ	76
4.4.2 検討した関数形	76
4.4.3 結果及び考察	77
4.5 結論	95
参考文献	97
第5章 変動騒音暴露に対してTTSの実験式を適用する上での二、三の考察	99
5.1 はじめに	99
5.2 変動騒音暴露によるTTSの予測について	100
5.2.1 暴露実験の概要	100
5.2.2 実験結果と予測計算の結果	102
5.3 持続時間の短い断続騒音暴露によるTTSの予測について	112
5.3.1 暴露実験の概要	112
5.3.2 実験結果と予測計算の結果	112
5.4 TTSの回復過程について	120
5.4.1 回復時間が短い場合	120
5.4.1.1 暴露実験の概要	120

5.4.1.2 実験結果と予測計算の結果	120
5.4.2 回復時間が長い場合	123
5.4.2.1 実験方法	123
5.4.2.2 実験結果と予測計算の結果	126
5.5 結論	129
参考文献	130
第6章 環境騒音暴露によるTTS推定の実験的研究	131
6.1 はじめに	131
6.2 模擬道路交通騒音暴露によるTTSの実験的研究	131
6.2.1 実験方法	131
6.2.1.1 被験者	131
6.2.1.2 暴露方法	132
6.2.1.3 域値の測定	134
6.2.2 実験結果	135
6.2.3 考察	138
6.3 実際の道路交通騒音のデータに基づいたTTSの予測例	140
6.3.1 道路交通騒音データの概要	140
6.3.2 予測計算の結果及び考察	141
6.4 結論	150
参考文献	151
第7章 総括	153
謝辞	158
付録	159

第1章 序論

1.1 はじめに

強大音に長時間常習的に暴露されると、回復不能な騒音性聴力損失(騒音性永久性感値移動: noise induced permanent threshold shift, NIPTS, 以下 PTS と略記する)が生じることは、古くから知られ¹⁾、労働衛生上の問題として研究が行われてきた。一方、強大音に短時間暴露された場合、回復可能な騒音性一過性感値移動(noise induced temporary threshold shift, NITTS, 以下 TTS と略記する)が生じることも知られている。この TTS と PTS の定量的関係については、ある騒音に1日8時間週5日以上²⁾の常習的暴露が長年続いた後の PTS は、聴力正常な青年が当該騒音に8時間暴露後 2min 休止した時点における TTS₂ と比較すると、1 kHz ではほぼ等しく、2 kHz では 5 dB 小さく、4 kHz では 3 dB 大きいと推定されている。さらには、1日8時間暴露で10年経過した後の PTS は、テスト周波数に関係なく、当該騒音に8時間暴露後の TTS₂ にほぼ等しいという、暫定的な仮定がおかれている²⁾。例えば、日本産業衛生学会勧告の「聴力保護のための騒音の許容基準³⁾」は、上記の PTS と TTS との関係を採用し、TTS 実験の成績^{4)~7)}に基づいて定められた。

このように、TTS は従来、労働衛生学的見地から研究が進められてきたのであるが、近年、航空機騒音や道路交通騒音などの強大な環境騒音のため、住民の聴力に対する影響も懸念され、環境騒音の有害性を評価する指標として、TTS が重視されている。すなわち、問題となる環境騒音を録音して、実験室内で被験者に暴露し、その TTS を測定し、その環境騒音の有害性を論ずるのである^{8)~10)}。しかし、環境騒音のようなそれほど高レベルでない騒音を、長時間にわたって暴露する TTS 実験は、多大な労力や費用を要する。もし TTS の有効な推定方法が確立されるならば、実際に暴露実験を行わなくても、暴露条件を与えることにより、当該騒音暴露に起因する TTS を数値シミュレーションによって算出することが可能となり、聴力保護のための環境騒音評価の向上に資するものと思われる。

そこで次節では、TTS の推定方法について、過去に行われた研究について概説する。

1.2 TTSの推定方法に関する従来の研究

1.2.1 定常騒音暴露による TTS

ヒトを対象とした TTS 実験は、1950 年代後半から行われるようになったが、中でも山本・高木ら^{4), 6), 7), 11)} (なお各文献の first author は異なるが、同一の機関で行われた一連の研究であるので、以降このように総称する場合がある。)と Ward ら¹²⁾ は精力的に実験を行い、多くの知見が得られた。

当初は、定常騒音を暴露した場合の TTS の増大と回復過程の定量表現についての研究がなされた。暴露音にはオクターブバンドノイズが採用されることが多く^{11)~13)}、この点に関しては、後述する暴露騒音の周波数構成と TTS のテスト周波数との関係も背景となっている。

Ward, et al.¹²⁾ は、聴力正常な 13 名の被験者に 4 種類のオクターブバンドノイズを暴露して、TTS の増大と回復を測定した。以降本節で紹介する従来の研究は、いずれも被験者には聴力健常者を採用したものである。彼は TTS の増大過程を暴露時間 T の常用対数と暴露レベル S の線形結合として、次式のように表した。

$$TTS = K(S - S_0) \{ \log_{10}(T/T_0) \} + C \quad (1.1)$$

ここで、 K 、 S_0 、 T_0 、 C は定数であり、その値は、各オクターブバンドと各テスト周波数について Table 1.1 に掲げるように与えられた。なお本研究では、式(1.1)のように、TTS を暴露時間や暴露レベルの関数で表現したものを TTS の増大(growth)の式と呼ぶことにする。回復過程については、テスト周波数によらず、暴露終了後 2 min の時点における TTS_2 の大きさによって次式のように定まるものとした。

$$TTS_t = (TTS_2 + 9) \{ 1 - 0.27 \log_{10}(t/2) \} - 9 \quad (1.2)$$

ここで、 t : 回復時間(min)である。また $TTS_2 \geq 50$ dB では上式は成立しなくなり、回復は遅延するとした。

庄司ら¹¹⁾ も 5 名の被験者にオクターブバンドノイズを暴露して、同様な TTS の増大の式を Table 1.2 に掲げるように与えている。

Table 1.1 Empirical equations for growth of TTS reported by Ward, *et al.*¹²⁾.

Exposure band (Hz)	Test frequency (Hz)	TTS ₂ (dB)
600-1200	1500	$0.53(S-71)(\log_{10} T-0.44)-3$
600-1200	2000	$0.41(S-68)(\log_{10} T+0.15)-8$
1200-2400	3000	$0.58(S-65)(\log_{10} T+0.55)-13.5$
1200-2400	4000	$0.61(S-70)(\log_{10} T-0.33)-9.5$
2400-4800	4000	$0.91(S-75)(\log_{10} T+0.19)-8$
2400-4800	6000	$0.51(S-68)(\log_{10} T+1.80)-22$

S : Octave band level of exposure noise (dB), T : Duration of exposure (min)

Table 1.2 Empirical equations for growth of TTS reported by Shoji, *et al.*¹¹⁾.

Exposure band (Hz)	Test frequency (Hz)	TTS (dB)
250-500	1000	$0.04(S+45.3)\log_{10} T+0.06S-9.7$
500-1000	1000	$0.24(S-48.8)\log_{10} T+0.34S-39.2$
500-1000	2000	$0.10(S+17.3)\log_{10} T+0.55S-59.1$
1000-2000	2000	$0.71(S-78.4)\log_{10} T+0.32S-29.9$
1000-2000	3000	$0.25(S-55.8)\log_{10} T+1.11S-99.4$
1000-2000	4000	$0.27(S-59.2)\log_{10} T+0.88S-77.9$
2000-4000	3000	$0.73(S-62.7)\log_{10} T+0.39S-40.6$
2000-4000	4000	$1.02(S-69.6)\log_{10} T+0.32S-30.6$

S : Octave band level of exposure noise (dB), T : Duration of exposure (min)

次に暴露騒音の周波数構成と TTS の関係については、雑音が純音をマスクする場合に見られる臨界帯域(critical band)と同様な概念が TTS の場合にも成立するかどうかという点について、Ward¹⁴⁾、Kryter¹⁵⁾、Miller¹⁶⁾、Yamamoto, et al.⁶⁾により検討された。TTS における臨界帯域説とは、つまり、あるテスト周波数における TTS の生起には、暴露音の特定の帯域内の成分だけが関与しているとするものである。Ward を除き、臨界帯域説が成立することには肯定的な立場をとる研究者が多く見られた。中でも、Yamamoto, et al.⁶⁾は、緻密な実験的検討を加えて、Table 1.3 に掲げるように 0.5~8 kHz における TTS の臨界帯域幅とその中心周波数を決定した。

Table 1.3 Critical bandwidth in dB and its center frequency.⁶⁾

Test frequency	Center frequency (Hz)	Bandwidth in dB and its 95% confidence limits
0.5 kHz	490	21.3±1.5
1 kHz	730	23.8±1.6
2 kHz	1400	26.0±0.8
3 kHz	2620	29.7±0.9
4 kHz	3040	30.5±0.8
6 kHz	3840	29.9±1.0
8 kHz	4950	33.3±0.8

さらに Takagi, *et al.*⁷⁾ は, 85~95 dB SPL の白色騒音を, 8時間にわたって5名の被験者に暴露する実験を行い, その結果を解析して, Table 1.2 のTTSの増大の式を発展させて, Table 1.4 に掲げる実験式を作成した。表中 S は, Table 1.1 及び Table 1.2 では暴露レベルをオクターブバンドレベルで表示したものであるのに対し, 各テスト周波数に対応する臨界帯域の中心周波数におけるスペクトルレベルを表している。以上により Table 1.3 及び Table 1.4 を組み合わせることによって, 任意の周波数構成を持つ定常騒音を暴露した場合の, 任意の暴露時間における TTS_2 の値を推定することが可能となった。

Table 1.4 Empirical equations for growth of TTS reported by Takagi, *et al.*⁷⁾.

Test frequency (Hz)	TTS_2 (dB)
500	$0.54(S-56.6)\log_{10} T - 0.47S + 26.1$
800	$1.08(S-56.9)\log_{10} T - 1.22S + 68.2$
1000	$1.18(S-55.1)\log_{10} T - 1.36S + 72.9$
1500	$0.72(S-43.5)\log_{10} T - 0.34S + 5.3$
2000	$0.25(S-19.3)\log_{10} T + 0.77S - 51.0$
3000	$0.85(S-37.4)\log_{10} T - 0.27S + 6.4$
4000	$1.36(S-41.9)\log_{10} T - 0.45S + 18.7$
6000	$0.88(S-39.1)\log_{10} T + 0.33S - 17.6$
8000	$0.98(S-44.1)\log_{10} T - 0.11S + 8.4$

S : Spectrum level of exposure noise (dB)

T : Duration of exposure (min)

Table 1.4 の増大の式は、Ward¹²⁾ の式 (1.1) と同じく、TTS の増大は暴露時間 T の常用対数と直線関係にあるとするものであるが、暴露時間と TTS の関係について言えば、次式のように 1 次遅れ系の指数関数を用いて表現する Keeler¹⁷⁾ の報告もある。

$$TTS = K \{1 - \exp(-T/T_0)\} \quad (1.3)$$

ここで、 K 、 T_0 は定数であるが、TTS の増大の式の関数形については第 4 章において詳細な検討を加える予定である。

1.2.2 非定常騒音暴露による TTS の推定方法

1.2.1 では定常騒音暴露による TTS の推定方法について述べた。暴露レベルが途中で変化したり、或は暴露が断続するような非定常騒音暴露による TTS の推定方法の場合も、基本的には、ある仮定をおいて、定常騒音暴露より得られた結果を応用することになる。Ward^{18)~20)} が幾つかの推定方法を次のように提案している。

(1) 暴露等価法則 (exposure-equivalent rule)¹⁸⁾

例えば、初めに T_1 min 暴露を行い、 τ_1 min 休止した後、再度同じ暴露レベルで T_2 min 暴露した後の TTS について考える。最初の T_1 min で生じた TTS が、それに続く休止時間の間に完全に回復せずに、2 度目の暴露直前つまり $(T_1 + \tau_1)$ min 経過時点において r dB だけ残っていたとする (回復の式 (1.2) から計算する)。この r dB の TTS を新たに生じさせるのに必要な暴露時間 Tr min を TTS の増大の式から逆算して求める。このとき $(T_1 + \tau_1 + T_2)$ min 後の TTS は、新たにそのレベルで $(Tr + T_2)$ min 連続暴露後の TTS に等しくなるというものである。これは r dB の残存 TTS が Tr min の暴露時間と等価であるという仮定に基づいた推定方法である。

(2) on fraction rule¹⁹⁾

(1) の方法が、暴露時間 on-time と休止時間 off-time が比較的長い場合に適用されるのに対して、この方法は、2 min 以下の短い周期 (duty cycle) で断続が繰り返される場合に適用される。この場合の TTS は、そのレベルで連続して暴露された場合の TTS に on fraction (on-time の duty cycle に占める割合) を乗じた値に等しいというものである。Ward, et al.¹⁹⁾ によると、暴露騒音としてピンクノイズを用いた場合の 4kHz の TTS_2 は次式で表される。

$$TTS = 1.06R(S-85)\log_{10}(T/1.7) \quad (1.4)$$

ここで、 R は on fraction であり、 S は暴露レベル(dB SPL)である。高木⁴⁾もこの方法は 4 min までの duty cycle の断続暴露に、適用可能であるという結果を得ている。

(3) 平均のレベルを用いる方法¹⁹⁾

(2)の方法を、さらに一般化して考える。暴露中にレベルが変動する場合、レベルが S_i である時間が全暴露時間に占める on fraction を R_i とすると、式(1.4)は

$$TTS = 1.06\left\{\sum_{i=1}^n R_i(S_i-85)\right\}\log_{10}(T/1.7) \quad (1.5)$$

となるとするものである。 $\sum_{i=1}^n R_i(S_i-85)$ の部分は平均のレベルを求めていることに他ならない。

(4) 騒音のレベルが高レベルから低レベルに変わった場合の推定方法²⁰⁾

高レベル H で T_{\min} 暴露し、続いて低レベル L で t_{\min} 暴露した後の TTS を推定する方法である。この場合の TTS は2つの成分の算術和として表現される。1つはレベル L で $(T+t)_{\min}$ 暴露された場合の TTS である。もう1つはレベル H で T_{\min} 暴露された時の TTS とレベル L で T_{\min} 暴露された時のそれとの差を TTS_0 とすると、 TTS_0 が騒音に暴露されずに t_{\min} の間に回復した場合に残存する TTS の値である。

以上の4種類の推定方法は Ward らの提案によるものであるが、適用できる騒音暴露条件が、各法によって異なり、暴露条件によって使い分けるか、または組み合わせる必要がある。また上記の方法のいずれを組み合わせても推定できない暴露条件が存在する。例えば、それぞれのレベルの持続時間が 2 min 以上で、レベルが2回以上変化し、それもしだいに減少していく場合などである。従って上記の方法は汎用性の高いものとは言い難い。

これに対して山本・高木⁵⁾は、単位階段関数(unit step function)でレベル変動を近似し、TTS の増大の式を適用する推定方法を開発した。この方法は定常騒音暴露による TTS の増大の式を、ある系の過渡応答であるとなすことにより、暴露レベルの変動をその系への入力信号として捉え、TTS を系の出力信号として計算するものである。

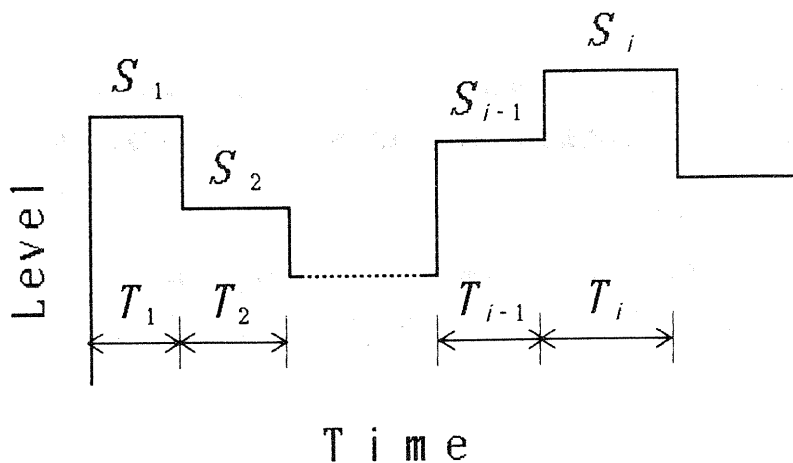


Fig. 4.1 An example of level fluctuation for Eq. (1.7).

Fig. 1.1 に示すようなレベル変動ならば，単位階段関数，

$$U(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases} \quad (1.6)$$

を用いて表示すると，

$$\begin{aligned} & S_1 [U(t) - U(t - T_1)] + S_2 [U(t - T_1) - U(t - T_1 - T_2)] \\ & + \dots + S_i [U(t - T_1 - \dots - T_{i-1}) - \\ & U(t - T_1 - \dots - T_{i-1} - T_i)] + \dots \end{aligned} \quad (1.7)$$

のように入力が表示される。入力 S の時の系の過渡応答，つまり TTS の増大の式を $f(S, t)$ とすると，系の出力信号である TTS は，

$$\begin{aligned} & f(S_1, t) - U(t - T_1) f(S_1, t - T_1) + U(t - T_1) f(S_2, t - T_1) \\ & - U(t - T_1 - T_2) f(S_2, t - T_1 - T_2) + \dots \\ & + U(t - T_1 - \dots - T_{i-1}) f(S_i, t - T_1 - \dots - T_{i-1}) \\ & - U(t - T_1 - \dots - T_{i-1} - T_i) f(S_i, t - T_1 - \dots - T_{i-1} - T_i) + \dots \end{aligned} \quad (1.8)$$

で与えられる。

式(1.8)では、回復過程に相当する部分には増大の式の符号だけを変えて代用させているが、ここに、回復過程の実験データから求めた回復の式を代入すれば、より高い精度の推定が可能となるものと思われる。しかし、この点について、Yamamoto, *et al.*⁵⁾は増大の式の符号を変えて回復の式の代用としても、実験データと予測計算値は良く一致したことを報告している。

1.2.3 長時間騒音暴露による TTS

1970年以降になると、ヒトを対象とした、16時間以上の長時間に及ぶ騒音暴露 TTS 実験についての幾つかの報告が見られるようになった。いずれも、定常騒音を暴露した場合に、TTS はある特定の暴露時間以降は、ほぼ飽和状態に達して、それ以後は増加せずにほぼ一定の値をとるようになることについての確認及びその値(漸近域値移動; asymptotic threshold shift, 以降 ATS と略記する)と暴露レベルとの量-効果関係の定量を目的としたものである。

Mills, *et al.*²¹⁾は、中心周波数 500 Hz のオクターブバンドノイズを、暴露レベル 81.5 dB SPL にて 48 時間、92.5 dB SPL にて 29.5 時間、1名の被験者に暴露して、100 Hz~4 kHz のテスト周波数において TTS の増大と回復を測定した。彼らはまた、中心周波数 0.5, 1, 2, 4 kHz のオクターブバンドノイズを用いて、暴露レベル 75~88 dB SPL の範囲で 16 時間もしくは 24 時間暴露して、1~7 kHz における TTS の増大と回復を測定した。被験者は暴露条件ごとに異なり、その数は3~12名である。彼らは、後述する Melnick²³⁾, Ward²⁴⁾らの実験結果も併せて考察を加えて、TTS の増大は暴露開始8時間後には、ATS の状態に達し、それ以後増加しないことを確認した。ATS の大きさについては、暴露レベルの関数として次式を提案した。

$$ATS = 1.7 [10 \log_{10} \{(I_e + I_c)/I_c\}] \quad (1.9)$$

ここで、 I_e は暴露レベル(dB SPL)であり、 I_c は暴露騒音の中心周波数によって異なる定数で、0.5, 1, 2, 4 kHz についてそれぞれ 82, 82, 78, 74 dB SPL である。上式によると、 $I_e > I_c$ の場合には、ATS と I_e の関係は直線関係となり、その傾きは 1.7 dB/dB である。また、TTS の増大と回復には、1次遅れの指数関数が適用できるとして、時定数として増大過程には 2.1 h を、回復過程には 7.1 h という値を与えている。彼らはその後、中心周波数 0.5~4 kHz のオクターブバンドノイズを合成した広帯域騒音を24時

間暴露する実験²⁵⁾、中心周波数 63, 125, 250 Hz のオクターブバンドノイズを採用した低周波数域での 24 時間暴露実験²⁶⁾ についても報告している。

Melnick²⁷⁾ は、300~600 Hz のオクターブバンドノイズを、80, 85, 90, 95 dB SPL の暴露レベルにおいて、10名の被験者に16時間暴露して、0.125~8 kHz のTTSの増大と回復を測定した。彼はまた、中心周波数 4 kHz のオクターブバンドノイズを、80, 85 dB SPL の暴露レベルにおいて、9名の被験者に24時間暴露し、0.25~10 kHz のTTSの増大と回復を測定した²³⁾。その結果、TTSは4 kHz 及び 6 kHz のテスト周波数において最大となり、8~12時間でATSのレベルに達するとした。ATSの値は、暴露レベル 80 dB SPL の場合、4 kHz で 9.3 dB, 6 kHz で 7.2 dB, 暴露レベル 85 dB SPL では、それぞれ 17.8, 14.6 dB であった。また、暴露レベルと ATS の関係には、Mills, et al.²²⁾ と同様に直線関係を充て、その傾きの値は 1.6 dB/dB であるとしている。彼はその後、暴露騒音にピンクノイズを採用し、76, 79, 82, 85 dBA の暴露レベルにおいて、10名の被験者に24時間暴露し、0.25~8 kHz の TTS を測定し²⁸⁾、85 dBA の暴露では、1~4 kHz において measurable な TTS を生じたことを報告している。

Ward²⁴⁾ は中心周波数 4 kHz のオクターブバンドノイズを、75, 80, 85 dB SPL の暴露レベルにおいて、10名の被験者に2~24時間暴露して4 kHz 及び 5.6 kHz のTTSの増大と回復を測定した。彼は、TTSは初め暴露時間の対数に比例して増加し、8時間前後でATSのレベルに達し、その後は増加しないというモデルを提案している。4 kHz または 6 kHz における ATS の値としては、暴露騒音として中心周波数 4 kHz のオクターブバンドノイズを用いた場合、暴露レベル 75, 80, 85, 90 dB SPL において、それぞれ 7, 14, 24, 36 dB という値を与えている。

また上記の Mills, et al.^{21), 22), 25), 26)}, Melnick^{23), 27), 28)}, Ward²⁴⁾ らはいずれも残響室内などの拡散音場に近い状態で、被験者の姿勢を拘束せずに騒音暴露を行っている。無響室を利用した自由音場での暴露では、被験者の姿勢を一定に保つ必要があるため、数時間の暴露が限界であることから、長時間の暴露には拡散音場が適しているものと思われる。なお、長時間騒音暴露 TTS 実験については、上記のほか Barry & Bilger²⁹⁾, Stephenson, et al.³⁰⁾, Benet, et al.³¹⁾ などの報告もあるが、詳細は第3章に譲る。

1.3 研究の目的と概要

前節 1.2 において概説したように TTS の研究動向をみると、周波数構成及びレベルの時間的変動が任意である騒音暴露に起因する TTS の推定方法については、山本・高木ら^{4)~7)}により多くの知見が得られている。この方法では、周波数構成の問題に対しては、TTS の臨界帯域説⁶⁾を適用する。また、定常騒音暴露による TTS の増大の式が、臨界帯域の中心周波数におけるスペクトルレベル及び暴露時間を説明変数として実験的に決定されており⁷⁾、暴露時間8時間までの定常騒音暴露に適用しうる。更に時間的変動に関しては、騒音のレベル変動を単位階段関数で近似し、上記 TTS の増大の式を適用して、TTS の増大と回復を計算する方法が提唱され、その妥当性が実験的に確認されている⁵⁾。ただし、その適用範囲から、衝撃性騒音暴露と、低レベル長時間暴露は除かれているが、前者はしばらく措くとしても後者は、TTS の増大の式の適用範囲を広げれば、問題は解決すると思われる。

TTS の増大の式が改良されると、環境騒音のような低レベル長時間暴露による TTS の予測を可能にし、必ずしも個別具体的な騒音を用いた実験をする必要がなくなり、騒音の有害性の評価が可能になると期待される。また、産業騒音暴露の場合でも、現在特定のレベル以下となる時間は off-time として無騒音と同様に取り扱っているが、これを低レベルの騒音に暴露されている時間として取り扱えば、より合理的な予測が可能になる。

従って、低レベル・長時間の場合の TTS に関する周到な実験を行うことは、TTS の増大の式の応用範囲を拡張するために必須であり、その結果、環境騒音の有害性の評価、産業騒音による聴力損失の予測精度の向上などに資することが期待される。このような観点から、本研究では以下のことを行う。

第2章では、長時間騒音暴露実験を行う上で、実験結果に影響を及ぼす因子について検討する。長時間騒音暴露実験では、残響室を用いた拡散音場内で行えば、幾つか利点があると考えられる。また、過去に行われた暴露実験のうち、有用な実験データの残されているものには、無響室を用いた自由音場内におけるものがある⁷⁾。そこで、汎用性の高い TTS の推定方法を確認するためには、より多くの実験データを対象とすることが望ましいので、両音場から得られる実験データの比較検討を行う。さらに、被験者を長時間拘束することによる、聴力域値への影響を検討するため、被験者の聴力測定を24時間にわたって行い、結果を解析する。

第3章では、低レベル広帯域定常騒音を数段階のレベル範囲で、24時間にわたって被験者に暴露し、継続的に TTS を測定する。

第4章では、第3章で得られた実験データ及び過去に行われた騒音暴露実験の有用なデータを併せて解析し、低レベル長時間暴露にまで適用可能な TTS の増大の式を導出する。

第5章では、第4章で得られた TTS の増大の式及び単位階段関数法を用いた推定方法を、種々の非定常騒音暴露実験の結果に適用し、その予測精度について検討する。TTS の回復過程についても考察を加える予定である。

第6章では、環境騒音のうち、道路交通騒音暴露を取り上げ、TTS を指標とした聴力影響評価を試みる。まず、道路交通騒音の模擬音を、レベルを数段階に変えて被験者に暴露し、どの程度の暴露レベルから TTS が生じるかを検討する。さらに第4章で作成した低レベル長時間騒音暴露に適用可能な TTS の増大の式及び単位階段関数法を用いて、TTS の予測値を算出し、実測値との比較を行い、当該手法によって、道路交通騒音暴露による聴力影響評価が可能であるかについて検討する。また、道路交通騒音の実測データの一例を取り上げて、24時間にわたる TTS の変動の予測計算を試みる。

以上、本研究では、TTS の推定方法を改良し、環境騒音の聴力に対する影響評価並びに産業騒音による聴力損失の予測精度を向上させるための基礎的な資料を得ることが目的である。

参考文献

- 1) B. ラマツツィーニ, 働く人々の病気, 松藤 元 訳(北海道大学図書刊行会, 札幌, 1980), p. 271.
- 2) J.C. Nixon and A. Glorig, "Noise-induced permanent threshold shift at 2000 cps and 4000 cps," J. Acoust. Soc. Am. 33, 904-908 (1961).
- 3) 日本産業衛生学会, "許容濃度等の勧告(1988)," 産業医学 30, 311-331 (1988).
- 4) 高木興一, "産業騒音の許容値に関する研究," 京都大学工学博士論文 (1968).
- 5) T. Yamamoto, H. Shoji and K. Takagi, "Prediction of temporary threshold shift following exposure to noise having arbitrary spectrum and temporal characteristics," 6th Int. Cong. Acoust. Tokyo, A-2-8, A-9-A-12 (1968).
- 6) T. Yamamoto, K. Takagi, H. Shoji and H. Yoneda, "Critical band with respect to temporary threshold shift," J. Acoust. Soc. Am. 48, 978-987 (1970).
- 7) K. Takagi, T. Yamamoto and H. Shoji, "Permissible noise criteria for hearing conservation," 7th Int. Cong. Acoust. Budapest, 25S2, 777-780 (1970).
- 8) 山本剛夫, 高木興一, 平松幸三, 山野 啓, "航空機騒音による TTS," 日本公衛誌 22, 289-296 (1975).
- 9) 岡田 諄, 海保葉子, 内藤丈士, 長尾まゆみ, 石井美香子, 中村賢二, 大藤周彦, 吉田吉紀, 佐藤 茂, "騒音暴露による TTS について," Audiol. Jpn. 20, 247-259 (1977).
- 10) W.D. Ward, E.M. Cushing and E.M. Burns, "TTS from neighborhood aircraft noise," J. Acoust. Soc. Am. 60, 182-185 (1976).
- 11) 庄司 光, 山本剛夫, 高木興一, "オクターブバンド騒音による TTS の研究," 音響学会誌, 22, 340-349 (1966).
- 12) W.D. Ward, A. Glorig and D.L. Sklar, "Temporary threshold shift from octave-band noise: applications to damage-risk criteria," J. Acoust. Soc. Am., 31, 522-528 (1959).
- 13) R. Plomp, D.W. Gravendeel and A.M. Mimpfen, "Relation of hearing loss to noise spectrum," J. Acoust. Soc. Am. 35, 1234-1240 (1963).

- 14) W.D. Ward, "Damage-risk criteria for line spectra," J. Acoust. Soc. Am. 34, 1610-1619 (1962).
- 15) K.D. Kryter, "Exposure to steady-state noise and impairment of hearing," J. Acoust. Soc. Am. 35, 1515-1525 (1963).
- 16) J.D. Miller, "Temporary threshold shift and masking for noise of uniform spectrum level," J. Acoust. Soc. Am. 30, 517-522 (1958).
- 17) J.S. Keeler, "Compatible exposure and recovery functions for temporary threshold shift—mechanical and electrical models," J. Sound Vib. 7, 220-235 (1968).
- 18) W.D. Ward, A. Glorig and D.L. Sklar, "Temporary threshold shift produced by intermittent exposure to noise," J. Acoust. Soc. Am. 31, 791-794 (1959).
- 19) W.D. Ward, A. Glorig and D.L. Sklar, "Dependence of temporary threshold shift at 4kc on intensity and time," J. Acoust. Soc. Am. 30, 944-954 (1959).
- 20) W.D. Ward, A. Glorig and W. Selters, "Temporary threshold shift in a changing noise level," J. Acoust. Soc. Am. 32, 235-237 (1960).
- 21) J.H. Mills, R.W. Gengel, C.S. Watson and J.D. Miller, "Temporary changes of the auditory system due to exposure to noise for one or two days," J. Acoust. Soc. Am. 48, 524-530 (1970).
- 22) J.H. Mills, R.M. Gilbert and W.Y. Adkins, "Temporary threshold shifts in humans exposed to octave bands of noise for 16 to 24 hours," J. Acoust. Soc. Am. 65, 1238-1248 (1979).
- 23) W. Melnick, "Temporary threshold shift following 24-hour noise exposure," Ann. Otol. Rhinol. Laryngol. 86, 821-826 (1977).
- 24) W.D. Ward, "Studies of asymptotic TTS," Conference No. 171, Proceedings, Aerospace Medical Panel Specialists Meeting, Advisory Group of Aerospace Research and Development (AGARD), NATO, Tronto (1975).
- 25) J.H. Mills, W.Y. Adkins and R.M. Gilbert, "Temporary threshold shifts produced by wideband noise," J. Acoust. Soc. Am. 70, 390-396 (1981).

- 26) J.H. Mills, J.D. Osguthorpe, C.K. Burdick, J.H. Patterson and B. Mozo,
"Temporary threshold shifts produced by exposure to low-frequency noises,"
J. Acoust. Soc. Am. 73, 918-923 (1983).
- 27) W. Melnick, "Human temporary threshold shift from 16-hour noise exposures,"
Arch. Otolaryngol. 100, 180-189 (1974)
- 28) W. Melnick, "Lower intensity limits of noise which produces measureble TTS
following 24-h exposure," J. Acoust. Soc. Am. 65(S1), S117 (1979).
- 29) J.P. Barry and R.C. Bilger, "Asymptotic threshold shift," J. Acoust. Soc.
Am. 62(S1), S93 (1977).
- 30) M.R. Stephenson, C.W. Nixon and D.L. Johnson, "Growth and recovery of tempo-
rary threshold shifts from 24 hour continuous, 48 hour continuous, and 48
hour intermittent noise exposure," J. Acoust. Soc. Am. 64(S1), S108 (1978).
- 31) T. Bennet, G. Bienvenue, A. Anthony and P. Michael, "Procedures for charac-
terizing certain effects of prolonged noise exposure," J. Acoust. Soc. Am.
63(S1), S64 (1978).

第2章 騒音暴露実験に影響を及ぼす因子に関する検討

2.1 はじめに

近年、TTSを指標として、環境騒音の有害性を評価しようとする幾つかの試みがなされており、それらの報告例にも、無響室を利用して自由音場に近い状態で行われたもの^{1)~3)}と残響室を利用して拡散音場に近い状態で行われたもの^{4),5)}とがある。2つの音場には、それぞれ利点があり、たとえば、自由音場では、MAF (minimum audible field)と同様な手順で、音場音圧の設定が可能なこと、暴露の再現性を高められることや、一つの無響室で、騒音暴露室と聴力検査室の両者を兼ねられることなどが挙げられる。他方、拡散音場では、複数の被験者に同時に暴露が可能のため、実験を効率的に遂行できることや、被験者の姿勢を拘束する度合いが低いために、特に長時間の暴露に適していることなどが考えられる。

しかし、騒音計による測定値が同じであっても、実験を行う音場の相違によって、被験者の鼓膜前面での音圧レベルが異なっている可能性があり、相互の結果を単純に比較することは難しい。また、同じ自由音場においても、スピーカの主軸と被験者の耳のなす角度により、鼓膜前面での音圧は変化する⁶⁾ので、たとえば、1個のスピーカの回りに複数の被験者を円弧状に並べて、実験の効率を上げようとする試み³⁾には問題点が多いと思われる。

次章では、残響室内において24時間にわたり、被験者に騒音を暴露するが、過去に、無響室内で行われたTTS実験の結果の中にも、非常に有用なデータ⁷⁾があり、これらを総合して、検討・評価することは有意義と考えられる。そのためには、音場の相違に起因するTTSの差を明らかにする必要があるため、無響室内と残響室内とにおいて、同一騒音を、同一被験者に暴露するTTS実験を行い、検討を加えた(2.2.2)。

ここで音場の測定に際しては、マイクロホンの特性に十分注意を払わねばならない。すなわち、マイクロホンの校正は、IEC⁸⁾では、自由音場で平面進行波に対して行うこととされているが、ANSI⁹⁾では、拡散音場でのランダム入射波に対して行うこととされている。従って、自由音場では、IEC規格のマイクロホンを使用し、拡散音場では、

ANSI 規格のものを使用するのが望ましい。たとえば、拡散音場において、IEC 規格の自由音場用マイクロホンを用いた場合、過小な音圧レベルを測定するという不都合が生じる¹⁰⁾。我国では、JIS¹¹⁾ が、基本的には、IEC に準拠しているため、自由音場用のマイクロホンを備えた騒音計が普及している。このため、これを屋内などの、拡散音場に近い条件の場所での測定に使用するには、なお、検討の余地がある。しかし、状況に応じて、騒音計のマイクロホンを交換したり、感度を切換えたりするのも繁雑である。そこで、この問題を、聴覚に対する影響という観点から、音場音圧よりも、むしろ被験者の鼓膜前面音圧に視点を移して、検討した(2.2.1)。本来ならば、被験者の鼓膜前面の音圧レベルは、プローブマイクロホン等を用いて、実耳の外耳道内で測定すべきであると思われる。しかし、プローブの外耳道挿入は、危険を伴うことや、人体について Shaw⁶⁾ が実測した結果と、音響測定用マネキンを使用して測定した結果とが、良く一致したという報告^{12), 13)} があることも勘案して、今回は、マネキンを使用した測定に止めた。

また、8時間を越えるような長時間騒音暴露実験の場合には、被験者を拘束することから生じる疲労などにより、聴力域値の移動が生じる可能性も否定できない。この点を検討するため、騒音を暴露せずに、5名の被験者の聴力域値を、24時間にわたり1時間毎に測定した(2.3)。この結果は、長時間騒音暴露実験の場合に、何を暴露前域値としたらよいかという点を検討するための基礎的資料ともなる。

2.2 騒音暴露を行う音場の差が実験結果に及ぼす影響に関する検討

2.2.1 音場測定

本実験の目的は、TTS 実験を行うにあたって、被験者の鼓膜前面での暴露音の音圧レベルが、自由音場と拡散音場とで、どの程度異なるかをマネキンを用いた物理的な測定により推定することにある。

なお、文中では、無響室内での実験には、『自由音場』という用語を用い、残響室内でのそれには、『拡散音場』という用語を用いているが、いずれも、測定用のマネキンや被験者が存在することから、定義通りの完全な音場ではなく、その音場に近い条件であることを意味している。

2.2.1.1 装置

自由・拡散両音場を、それぞれ実現するために、大阪府公害監視センターに設置された無響室(有効寸法 $3.6\text{ m} \times 4.3\text{ m} \times 4.25\text{ m}$)及び残響室(体積 101 m^3 , 表面積 133 m^2)を使用した。

両音場に放射する騒音としては、ランダム雑音発生装置(B & K, 1027)より発生させた定常白色騒音を用い、増幅器(TEAC, AE-200)で所定のレベルに調整して、スピーカより放射した。

自由音場用、拡散音場用のマイクロホンには、それぞれ B & K 社の 4145 型及び 4144 型 1 インチマイクロホンを用いた。

鼓膜前面の音圧をシミュレートするために、Zwislocki の人工耳¹⁴⁾ (Industrial Research Products, DB100 ; マイクロホンには B & K, 4134 を使用)を右耳の部分に内蔵した KEMAR マネキン¹²⁾ (Knowles Electronics Manikin for Acoustic Research ; Industrial Research Products, DB4004)を使用した(Fig. 2.1)。

各マイクロホンからの出力は、測定アンプ (B & K, 2606), $1/3$ オクターブバンド分析器 (B & K, 3348)及びマイクロコンピュータ(HP, 9845)を用いて解析・記録した。

2.2.1.2 実験手順

(1) 自由音場(無響室)

無響室内にスピーカを設置し、それから 2 m 離して、スピーカの主軸

上に自由音場用 1 インチマイクロホンを設置した。なお、スピーカの主軸は、床面に平行で、床上 1.3 m の高さに設定した。これはマネキンの外耳道口の高さに一致させるためである。

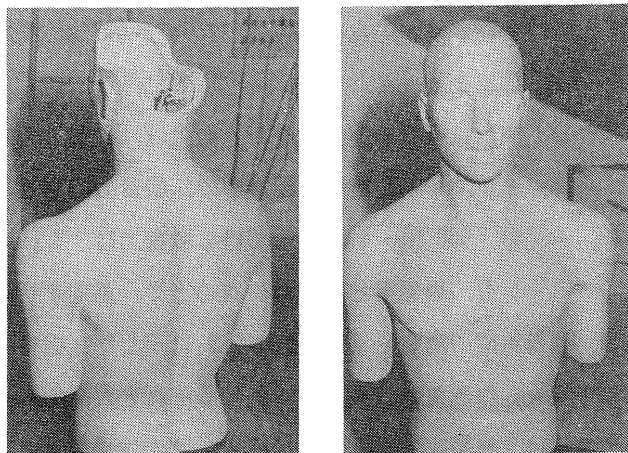


Fig. 2.1 KEMAR manikin.

スピーカから定常白色騒音を放射させ、上記のマイクロホンの位置で、86 dB SPL となるようにレベルを設定した。このときのスピーカへの入力信号の大きさは、無響室における測定を通じて、一定に保った。測定は、まず自由音場用マイクロホンを用いて、中心周波数 250 Hz~12.5 kHz の 1/3 オクターブバンド分析を行った。続いて、マイクロホンを撤去した後、マネキンを、測定側(右)の外耳道口が自由音場用マイクロホンのダイアフラムがあった位置に一致させ、スピーカの主軸上に設置した。実際の騒音暴露実験の条件を考慮して、マネキンの胴体は着衣の状態とし、頭部には純毛製の帽子をかぶせた。この状態で、同様な 1/3 オクターブバンド分析を行った。さらに、マネキンの支持台を固定した上で、マネキンをスピーカの主軸に正対させて、同様な測定を行った。これをマネキンの正中面とスピーカの主軸のなす方位角で表すと、前者は 90°、後者は 0° に相当する。

(2) 拡散音場(残響室)

残響室では、次のように室内の残響状態を2通りに変えて、音場測定を行った。また、各条件につき、室内5地点において、125 Hz~16 kHzの残響時間を測定した。

条件A：室内の残響時間ができるだけ大きくなるようにした。このときの 500 Hz~4 kHz における吸音力は、 $2.3\text{ m}^2\sim 6.7\text{ m}^2$ であった。マネキンは裸の状態で測定を行った。

条件B：実際に騒音暴露実験を行う際には、被験者や家具が存在するため、グラスウールマットを室内に配置して、吸音力を増加させた。また、室内の換気も行い、500 Hz~4 kHz における吸音力は、 $7.6\text{ m}^2\sim 12.0\text{ m}^2$ となった。マネキンも、無響室と同様に着衣の上で、測定を行った。

なお、残響時間の測定結果を Fig. 2.2 に示した。図中の黒四角は、条件Aにおける測定値の平均を、白四角は、条件Bにおけるそれを表している。

音場測定は、無響室と同様な白色騒音を室内に放射して、条件Aの下で、部屋の中央付近の音圧レベルが、83 dB SPL となるように設定した。このときのスピーカへの入力信号の大きさは、残響室における測定を通じて、一定に保った。測定は、拡散音場用マイクロホン、自由音場用マイクロホン、マネキンのそれぞれについて、中心周波数 250 Hz~12.5 kHz の 1/3 オクターブバンド分析を行った。マイクロホン、マネキンの外耳道口の位置は、共に床上 1.3 m に設定した。また、室内の音場分布の影響を考慮して、室内5地点、各地点につき、マイクロホン、マネキン共に、東西南北の4方向の計 20 回測定した。

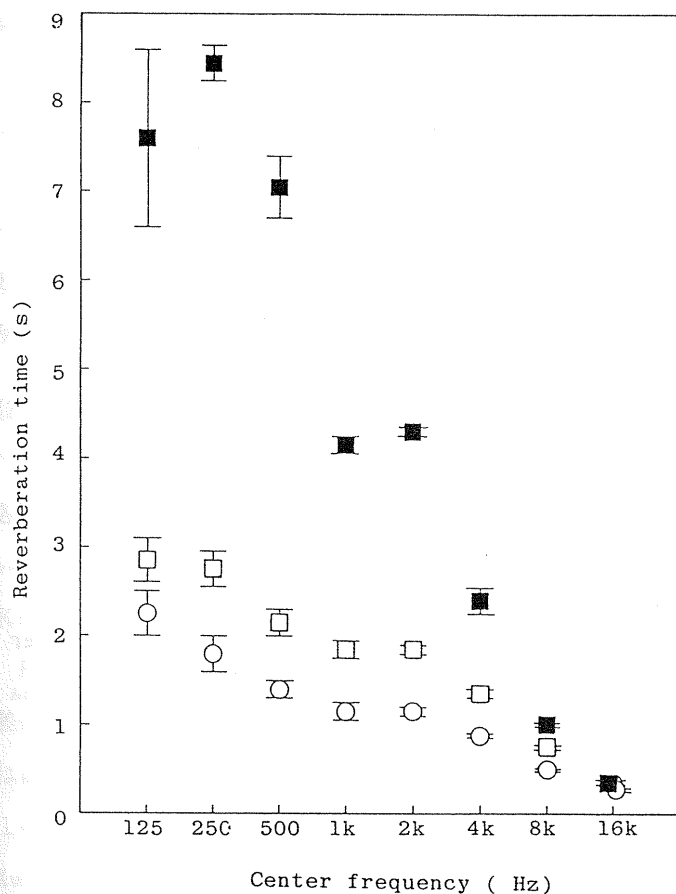


Fig. 2.2 Reverberation times of the room used for sound field measurement and noise exposure. Symbols indicate the arithmetic means of the reverberation time, and vertical bars show the standard deviations. Solid squares denote the measurements in Condition A, open squares denote those in Condition B, and open circles denote those in the condition of exposure.

2.2.1.3 実験結果及び考察

(1) 自由音場(無響室)

Fig. 2.3 及び Fig. 2.4 の中の黒丸は、それぞれ方位角 0° , 90° の場合について、マネキンの鼓膜前面に相当する位置における音圧レベルから、音場測定用のマイクロホンの音圧レベルを差し引いた値を示したものである。これは、自由音場からマネキンの鼓膜相当部分への音圧レベルの変換特性 (sound pressure level transformation) を表したものであり、以下、マネキンの音圧レベル変換特性と称する。また、図中にハッチングで示した範囲は、これまでに報告された、自由音場において KEMAR マネキンを用いた実験結果^{12), 13), 15)} を表している。

Fig. 2.3 及び Fig. 2.4 より分かるように、自由音場では、マネキンの音圧レベル変

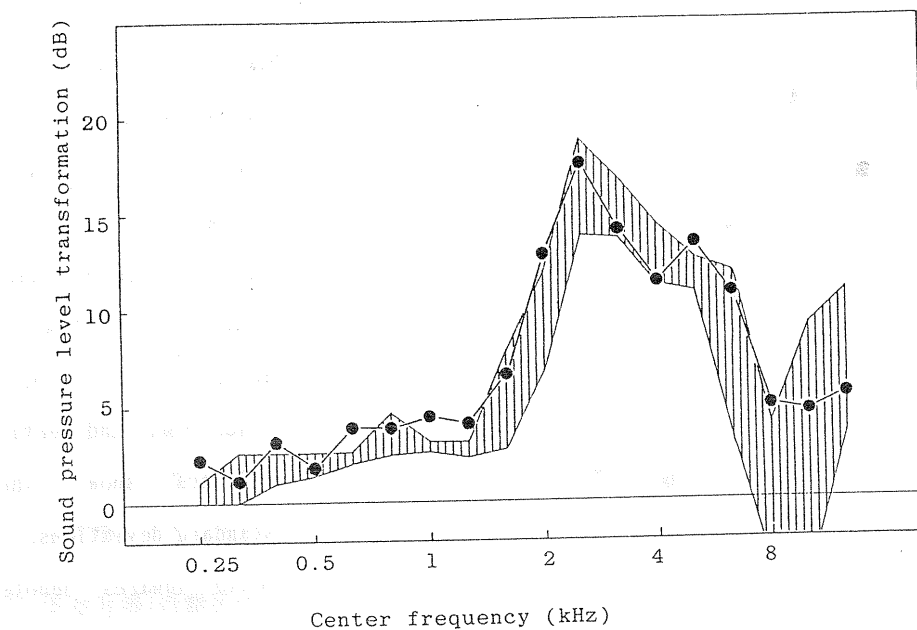


Fig. 2.3 Sound pressure level transformation from the free-field to the coupler microphone of KEMAR manikin with source azimuth angle of 0° . Hatched area represents the range of measurements by other workers^{(12), (13), (15)}.

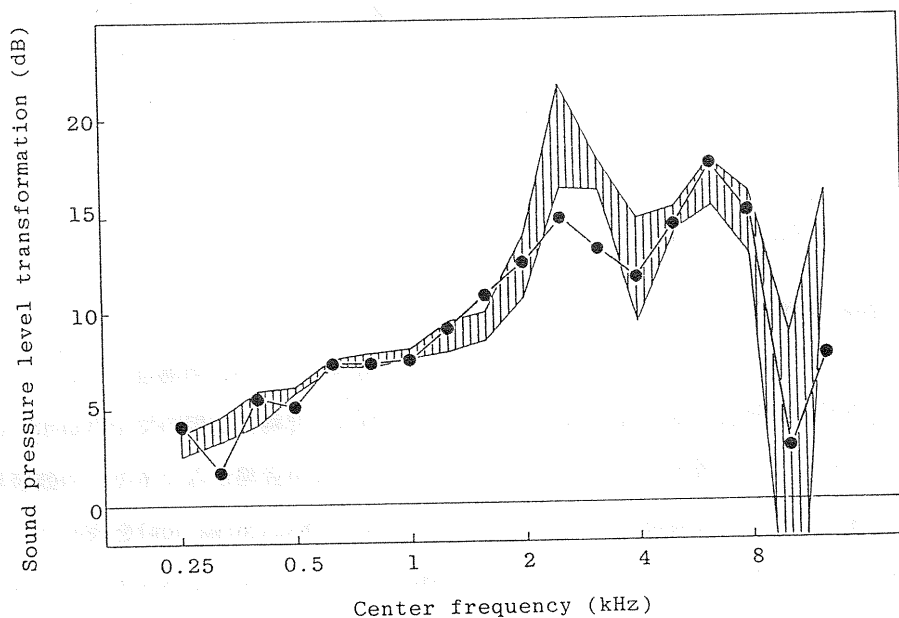


Fig. 2.4 Sound pressure level transformation from the free-field to the coupler microphone of KEMAR manikin with source azimuth angle of 90° . Hatched area represents the range of measurements by other workers^{(12), (13), (15)}.

換特性には2つのピークがある。第1のピークは、中心周波数 2.5 kHz 付近のものであり、方位角 0° では 17.5 dB であるが、 90° では 14.7 dB とやや低くなっている。これに対して、第2のピークは、中心周波数 5~6.3 kHz のものであり、方位角 0° では 13.3 dB、 90° では 17.5 dB と第1のピークとは逆の傾向を示している。この二つのピークは、Burkhard and Sachs¹²⁾ が指摘しているように、耳介も含めた有効外耳道長が、それぞれ $1/4$ 波長、 $3/4$ 波長に相当する共振周波数を表しているものと思われる。また、今回の結果は、他の研究者の結果と比べてみても大差は認められない。

(2) 拡散音場(残響室)

Fig. 2.5 は、拡散音場におけるマネキンの音圧レベル変換特性の平均値を、A、Bの各残響条件ごとに示したものである。音場測定には、拡散音場用のマイクロホンを用いている。また、図中にハッチングで示した範囲は、Kuhn¹⁶⁾ が種々の大きさの耳介の模型を KEMAR マネキンに取り付けて、拡散音場において実験した結果を表している。

Fig. 2.5 より分かるように、マネキンの音圧レベル変換特性は、両条件間でほとんど差はないと言ってよい。高周波数の領域で、条件Aの方が条件Bをやや上回るが、その差は高々 1 dB である。また、拡散音場の場合に観測されるピークは、自由音場の場合の第1のピークに相当する中心周波数 2.5 kHz 付近のものだけである。また、今回の成績と Kuhn¹⁶⁾ の報告との間には、著明な差は認められないと言うことができる。なお、各中心周波数における測定値(5地点×4方向で 20 個)のばらつきの範囲は、2~3 dB であり、測定地点・方向による系統的な変化は認められなかった。

(3) 両音場における結果の比較

実際の騒音暴露実験を想定した場合に、鼓膜前面の音圧レベルに、両音場でどの程度の相違があるかを推定する際の目安として、マネキンの音圧レベル変換特性を比較することは、有用と考えられる。それを図示したものが Fig. 2.6 である。図中の黒丸は、自由音場(無響室)で、スピーカの主軸と暴露耳の外耳道口を一致させた方位角 90° のデータを示している。また白四角は、Fig. 2.5 の拡散音場(残響室)における条件Bのデータを示したものである。これに加えて、拡散音場において、自由音場用マイクロホンを用いて、測定した場合に得られるマネキンの音圧レベル変換特性を、半分が黒い四角で示した。同様に、これも条件Bの下での測定結果である。

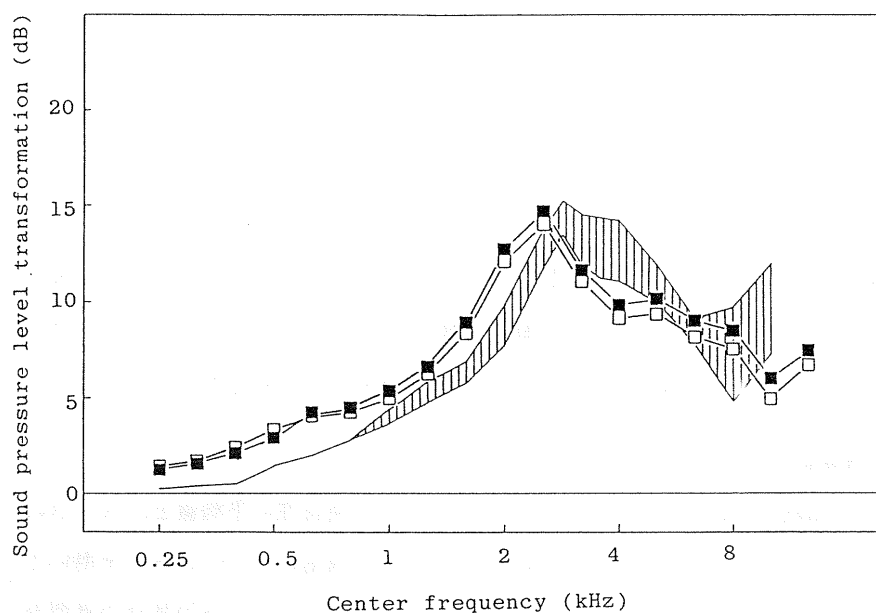


Fig. 2.5 Sound pressure level transformation from the diffuse-field to the coupler microphone of KEMAR manikin. Symbols indicate the means of 20 measurements in the reverberant room. Solid squares denote the measurements in Condition A, and open squares denote those in Condition B. Hatched area represents the range of measurements by Kuhn¹⁰.

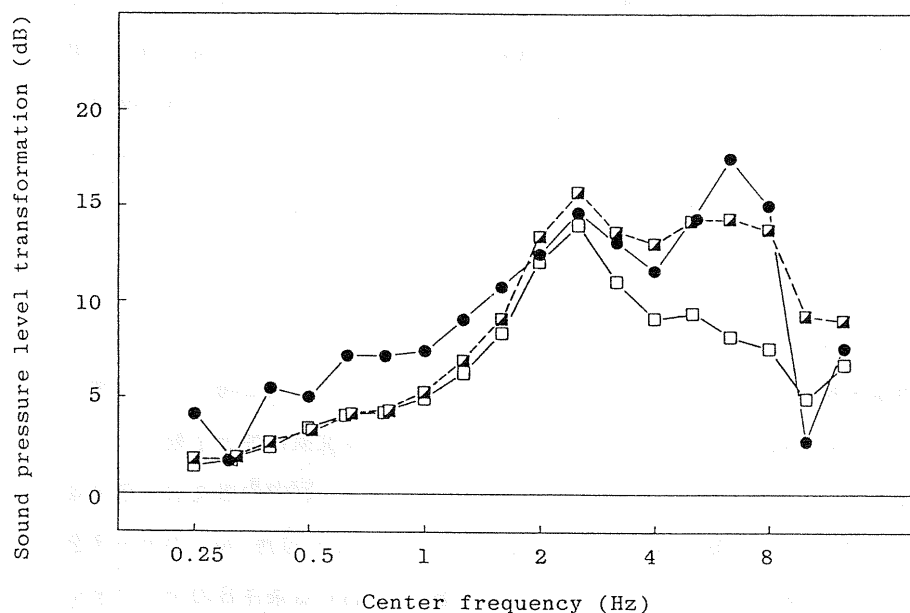


Fig. 2.6 Comparison between the sound level transformations from the free-field and the diffuse-field to the coupler microphone of KEMAR manikin. Solid circles indicate the measurements in the free-field with source azimuth angle of 90°, open squares indicate those in the diffuse-field using the random incidence microphone, and semi-solid squares indicate those in the diffuse-field using free-field microphone.

それぞれの音場に応じた特性を持つマイクロホンを用いて、各音場の音圧レベルを測定した場合、自由音場におけるマネキンの音圧レベル変換特性は、拡散音場におけるそれを、中心周波数 0.25~8 kHz の広い領域にわたって上回る。特に、その差は、中心周波数 4~8 kHz の帯域において顕著で、6.3 kHz では 9.3 dB にも及んでいる。これに対して、拡散音場内においても自由音場用マイクロホンを使用した場合には、中心周波数 4~8 kHz における両変換特性の差はかなり小さくなる。ただし、中心周波数 0.25~1.6 kHz の低周波数領域での差は変らない。これは、拡散音場用マイクロホンの方が、高周波数領域での感度を大きくしてあるためで、Brüel¹⁰⁾によると、その大きさは、1 インチマイクロホンの場合、2 kHz で 1.1 dB、5 kHz で 3.0 dB、10 kHz では 6.8 dB となっている。今回もこれとほぼ同じ結果を得ていることが、Fig. 2.6 より分かる。

従って、自由・拡散両音場において、音圧レベルの設定を行う際には、各音場に合ったマイクロホンを用いるよりも、両者共に自由音場用マイクロホンを用いた方が、鼓膜前面の音圧の周波数特性の差は、少なくとも高周波数領域の部分では、より小さくなることが推測される。これを、TTS 実験への影響という面でとらえると、以下の様になる。すなわち、特定のテスト周波数における TTS は、暴露騒音のある一定の周波数帯域(臨界帯域と称する)内の音響エネルギーのみの影響を受け、この臨界帯域からはずれた部分のエネルギーには無関係であることが、既に実験的に証明されている¹⁷⁾ので、その臨界帯域を Fig. 2.6 に適用して、臨界帯域内音響エネルギーの音場による相違を算出することが可能となる。実際に、その値([自由音場における鼓膜前面音圧レベル] - [拡散音場における鼓膜前面音圧レベル])を概算してみたところ、Table 2.1 に示す値を得た。両音場共に自由音場用マイクロホンを用いた場合の方が、各音場で、それぞれに応じたマイクロホンを用いた場合よりも、高いテスト周波数における差の絶対値は小さくなっている。

なお音場差に関しては、ISO¹⁸⁾ が拡散音場と自由音場とで、等しいラウドネスを得るための暴露音のレベルの補正値を勧告している。ISO の提示した条件では、自由音場においては、被験者は音源に対して正対することになっている。そのため、Fig. 2.2 の方位角 0° のデータと、Fig. 2.4 の条件 B のデータから ISO の勧告値に相当する値を算出して、図示したものが Fig. 2.7 である。黒丸が今回のデータからの算出値を、白丸が ISO の勧告値を示している。ただし、あくまでもこれは、鼓膜前面での暴露音のレベルが等しい場合には、等しいラウドネスが得られるという仮定に基づいている。ISO の提示条件では、さらに、両耳聴・狭帯域騒音の採用といった、今回の実験条件とは、聴覚生理機構の関与から考えて異なる面もあるが、結果は、ほぼ同様な傾向にあるとみなすことができる。

Table 2.1 Differences between the critical band level transformation from the free-field and the diffuse-field.

Test frequency of TTS (kHz)	$L_{free}-L_{diff}^*$ (dB)	$L_{free}-L_{diff}^{**}$ (dB)
0.5	1.9	2.0
1	2.7	2.7
1.5	3.0	2.9
2	2.9	1.9
3	1.2	-0.9
4	1.8	-0.8
6	2.5	-1.3
8	6.2	0.8

L_{free} : Critical band level transformation from free-field

L_{diff}^* : Critical band level transformation from diffuse-field using random incidence microphone

L_{diff}^{**} : Critical band level transformation from diffuse-field using free-field microphone

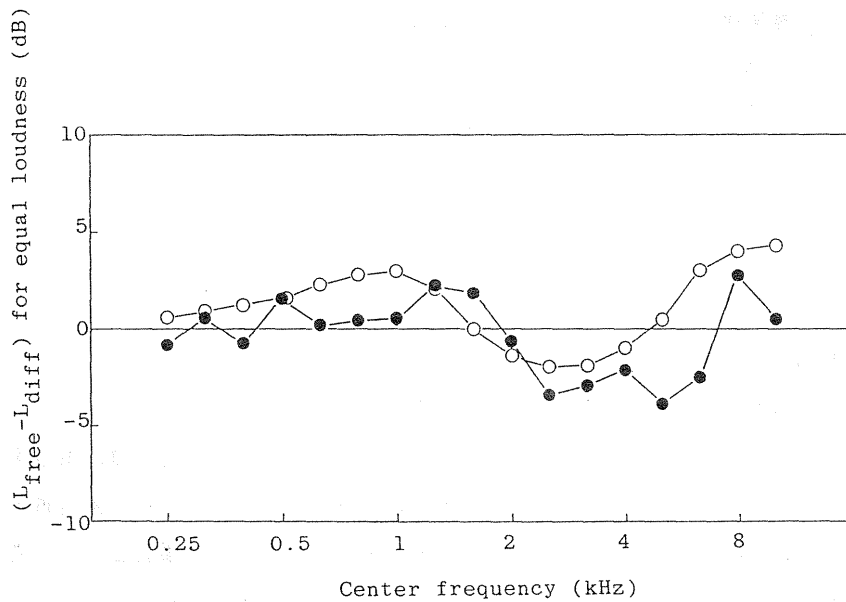


Fig. 2.7 Differences between the sound pressure level transformation from the free-field and the diffuse-field. Solid circles indicate observed data, and open circles indicate ISO Recommendation¹⁸⁾.

2.2.2 騒音暴露実験

2.2.1 の結果によると、自由・拡散両音場において、音圧レベルの測定に自由音場用マイクロホンを用いた場合、鼓膜前面における暴露音の周波数特性は、6~8 kHz 付近の帯域で、自由音場の方が拡散音場のそれを、2~3 dB 上回るものの、2~5 kHz の帯域では、両音場で大差ないことが推測される。本実験では、両音場において、実際に被験者に対し、同一騒音(音場測定に自由音場用マイクロホンを使用)を暴露して、TTS を測定し、音場の相違が TTS 実験に及ぼす影響を定量的に捉えることを、目的としている。

2.2.2.1 被験者

被験者には、男子学生 10 名(年齢 21~24 歳)を採用した。各被験者の聴力域値は、0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4, 6, 8 kHz の各テスト周波数において、ISO (1964)¹⁹⁾ 基準の聴力レベル(hearing level)で 20 dB 以下である。10 名の被験者の選定にあたっては、単に正常な聴力をもつことだけでなく、オーディオメトリに習熟し、かつ域値が安定していることにも留意した。なお自由・拡散両音場での騒音暴露の比較は、同一の被験者について行った。

2.2.2.2 装置

自由音場における騒音暴露は、京都大学衛生工学教室に設置された防音無響室(有効寸法 2 m × 2 m × 2 m)を使用した。暴露騒音は、ランダム雑音発生装置(B & K, 1024)より発生させた定常白色騒音をイコライザ(General Radio, 1925)に通し、0.9 kHz 以下及び 9 kHz 以上の成分を遮断して作製し、増幅器(SONY, TA-F4)で所定のレベルに調整して、スピーカより放射した。

拡散音場における騒音暴露は、2.2.1 で使用した残響室内で行った。暴露騒音は、同様にランダム雑音発生装置(B & K, 1027)、イコライザ(前掲)を用いて作製し、増幅器(TEAC, AE-200)で所定のレベルに調整して、4 個の無指向性スピーカより放射した。

両音場における暴露音のレベルは、自由音場用 1 インチマイクロホン(B & K, 4145)を用いて、精密騒音計(B & K, 2203)で監視した。

また、被験者の域値の測定には、自記オーディオメータ(永島医科器械, A60-C)を用いた。レシーバ(Telephonics, TDH-39; MX41/AR クッション付)の出力音圧は人工耳(B & K, 4153)及び精密騒音計(B & K, 2203)を用いて校正した。

2.2.2.3 実験手順

(1) 暴露方法

両音場における暴露騒音の 1/3 オクターブバンド分析の結果を Fig. 2.8 に示した。図中の黒丸は、防音無響室内における測定値を、白丸は、残響室内 16 地点における測定値の平均値を表している。

防音無響室の場合は、外耳道口の位置がスピーカから 1.2 m の距離になるように、右耳をスピーカに向けて、被験者を椅子に着席させた。Fig. 2.8 のデータは、被験者を退室させた後、その右側外耳道口の位置で、測定したものである。

防音無響室では、被験者 1 名ずつに暴露するのに対して、残響室の場合は、室内にリクライニングチェア等を搬入しておき、2名の被験者に同時に暴露した。Fig. 2.8 のデータは、室内には家具を設置しているが、被験者のいない状態で、測定したものである。また、前掲の Fig. 2.2 には、被験者入室の状態での室内の残響時間の測定結果もあわせて、白丸で示した。

Fig. 2.2に示すように、残響室内は高周波成分の残響時間が短く、室内は完全な拡散音場ではないが、音圧レベルの分布の標準偏差は 1 dB 未満であり (Fig. 2.8)、音場はほぼ均一とみなすことができる。従って、残響室内での被

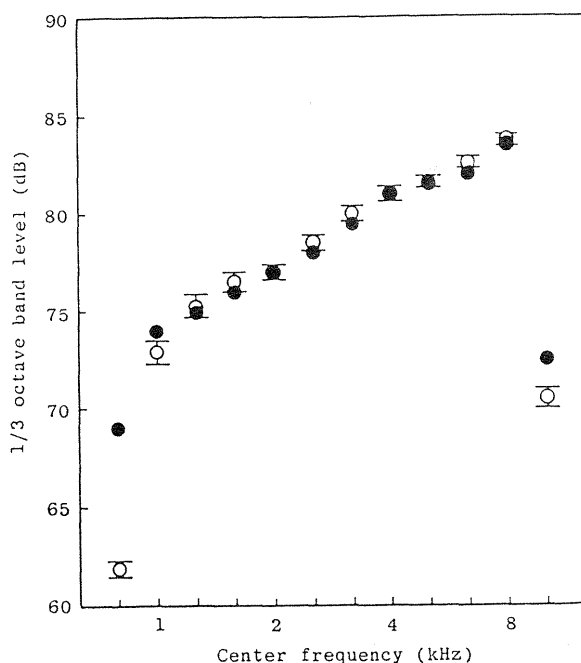


Fig. 2.8 One third octave band analysis of exposure noise. Solid circles indicate the measurement in the anechoic room. Open circles indicate the means of 16 measuring points in the reverberant room, and vertical bars show standard deviations.

験者の位置によって、暴露音の特性が異なることはないと考えられる。また、Fig. 2.8より分かるように、防音無響室、残響室の両音場間にも、自由音場用マイクロホンで測定した場合には、暴露音の特性に差はないと考えられる。

暴露音は、0.9 kHz 以下及び 9 kHz 以上の成分を遮断した広帯域定常騒音であるが、この周波数帯域は、テスト周波数 2~8 kHz における TTS の臨界帯域¹⁷⁾を包含する。暴露レベルは、オーバーオール音圧レベルで 80, 83, 86, 89 dB の4条件とした。それぞれの場合のスペクトルレベルは 42, 45, 48, 51 dB となった。

暴露時間は 60 min で、Fig. 2.9 に示すように、暴露開始後 10, 20, 40, 60 min の時点で、それぞれ域値の測定を行った。域値の測定に伴う暴露の中断時間は、1回につき、3.5 min である。この中断時間は暴露時間には算入していない。

前述したように残響室内での暴露は、複数の被験者に対して、同時に行った。ただし、所定の暴露時間後の域値の測定は、一人ずつ行わねばならないので、暴露開始前の域値を測定した後、被験者ごとに 5 min ずつずらして入室させて行った。室内では、リクライニングチェアなどに腰掛けさせ、楽な姿勢をとらせた。

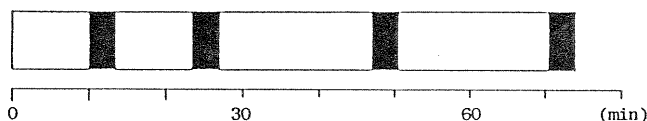


Fig. 2.9 Schematic schedule of noise exposure. Open area represents noise exposure, and solid area represents 3.5-min-off-time for audiometry. Total exposure time is 60 min.

室内の音場はほぼ均一とみなしうるが、念のため、適宜、被験者にその位置を移動させた。

暴露は、被験者の片耳(右耳)について行い、防音無響室では、スピーカに対して暴露耳を向けて、その位置を変えないようにさせ、残響室内では、対耳(左耳)に終始耳栓(Marison Health and Safety, DECI DAMP)を着用させた。

また、いずれの被験者についても、暴露実験を行った後、少なくとも 24 時間は次の暴露実験を行わず、また、暴露レベルも低いものから順に行うようにした。なお、自由音場における暴露実験をすべての被験者について終えた後で、拡散音場における実験に移行した。

(2) 域値の測定

域値の測定は、防音無響室では、同室内にて行い、残響室では、隣接した無響室内（前掲）にて行った。両音場とも、同一自記オーディオメータを用い、テスト周波数固定・

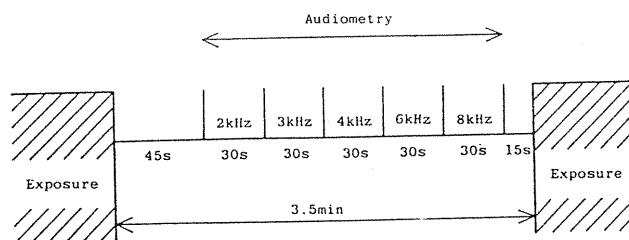


Fig. 2.10 Schematic schedule of audiometry.

断続音（断続の周波数 2 Hz）
・レベルの変化速度 2 dB/s

の条件に設定した。上昇法と下降法の平均値（オーディオメータで自記記録した鋸歯状曲線の上下端値の平均値）を域値とした。

暴露実験開始前に、まず両耳の 0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4, 6, 8 kHz の域値を測定し、再び右耳の 2, 3, 4, 6, 8 kHz の域値を測定し、これを開始前域値とした。暴露中は、Fig. 2.10 に示すように、暴露中断 45 s 後から 30 s ごとに、順に 2, 3, 4, 6, 8 kHz の測定を行った。なお、2.2.1 では、一応 0.5~1.5 kHz のテスト周波数についても検討しているが、この帯域の TTS は、暴露レベルをかなり高くしないと、有意なものを得ることが難しいので、今回の暴露実験には含めなかった。

2.2.2.4 実験結果及び考察

(1) 暴露前域値

TTS は、暴露後の域値から暴露前のそれを差し引いた値として表すが、今回のように、数回にわたる一連の実験を遂行するために、長期間を要する場合には、暴露前域値として、何を用いたら良いかという点についても、検討しておくことが望ましい。このため、以下に述べる3つのケースについて、それぞれ TTS を算出して、比較を行った。

ケース1：各回の実験の開始前域値を暴露前域値とする。

ケース2：各音場について開始前域値の平均値 ($n=4$) を暴露前域値とする。

ケース3：全実験を通じて開始前域値の平均値 ($n=8$) を暴露前域値とする。

各ケースについて、得られた TTS の値を用いて、山本・高木らの TTS の増大の式²⁰⁾と同様な重回帰分析を、各テスト周波数について行った。この TTS の増大の式

は、次式のように与えられている。

$$TTS = a(S - b) \log_{10} T + cS + d \quad (2.1)$$

ただし、 S : 暴露音のスペクトルレベル (dB)

T : 暴露時間 (min)

a, b, c, d : 定数

その上で、各テスト周波数に対する寄与率（重相関係数の平方）の平均値を求めたところ、ケース1で最大となった。従って、今回はケース1の方法で、各被験者の暴露前域値を決定し、TTSを算出した。

(2) TTS の増大

各テスト周波数における 10 名の TTS の平均値（以下 TTS は特に断らない限り 10 名の平均値をさす）の時間的変動を Fig. 2.11~2.15 に示した。図中の左右の折線群は、それぞれ自由音場、拡散音場における TTS の増大を示している。また、横軸の暴露時間は対数軸である。

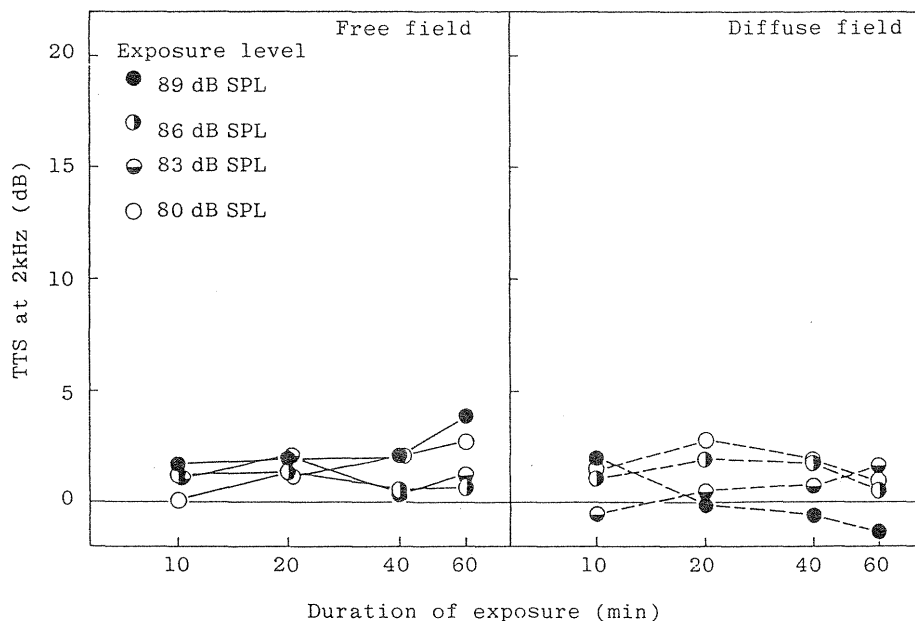


Fig. 2.11 Growth of TTS at 2 kHz. TTSs are the mean values over ten subjects. Solid lines (left) indicate the results in the anechoic room, and broken lines (right) indicate those in the reverberant room.

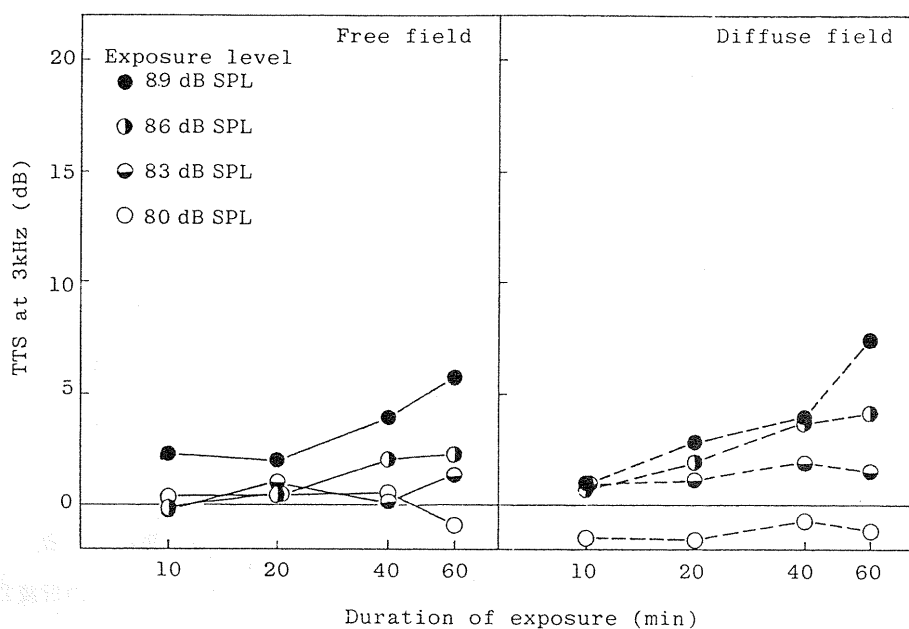


Fig. 2.12 Growth of TTS at 3 kHz. TTSs are the mean values over ten subjects. Solid lines (left) indicate the results in the anechoic room, and broken lines (right) indicate those in the reverberant room.

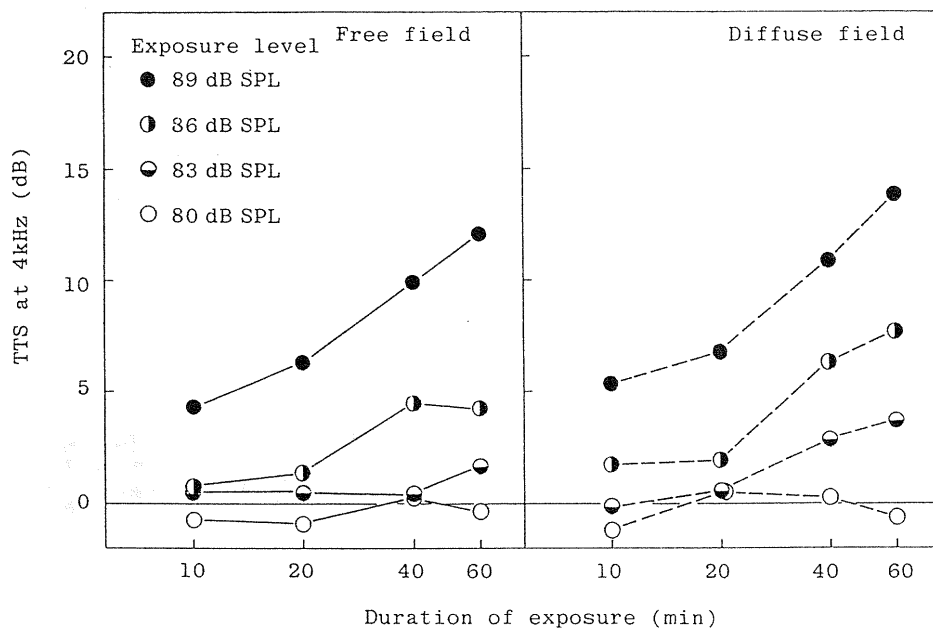


Fig. 2.13 Growth of TTS at 4 kHz. TTSs are the mean values over ten subjects. Solid lines (left) indicate the results in the anechoic room, and broken lines (right) indicate those in the reverberant room.

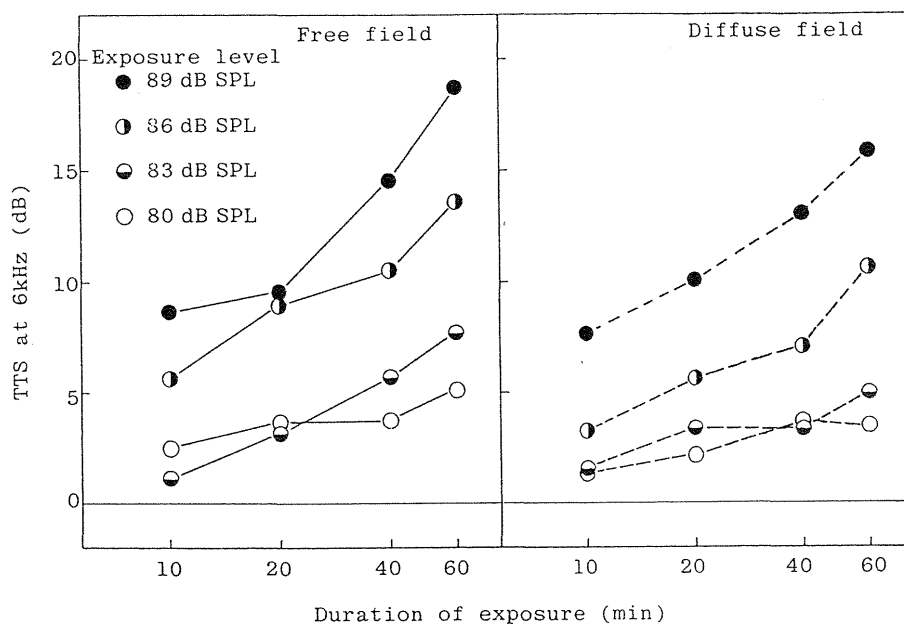


Fig. 2.14 Growth of TTS at 6 kHz. TTSs are the mean values over ten subjects. Solid lines (left) indicate the results in the anechoic room, and broken lines (right) indicate those in the reverberant room.

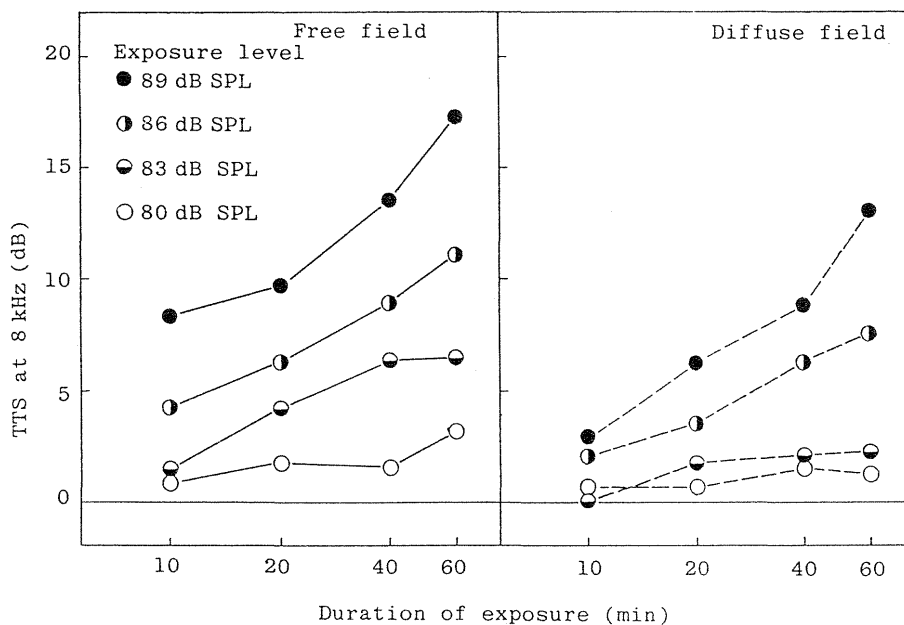


Fig. 2.15 Growth of TTS at 8 kHz. TTSs are the mean values over ten subjects. Solid lines (left) indicate the results in the anechoic room, and broken lines (right) indicate those in the reverberant room.

テスト周波数 2 kHz (Fig. 2.11) についてみると、TTS の値は小さく、暴露レベル、音場による差は観測されない。暴露前域値と暴露後域値の平均値間にも、有意水準 5% での有意差はほとんど認められなかった。これは、このテスト周波数にとっては、暴露音のレベルが低かったためと考えられる。従って、以降の解析では、テスト周波数 2 kHz のデータは除外して取り扱う。

テスト周波数 3, 4, 6, 8 kHz (Fig. 2.12~2.15) については、それぞれ暴露時間の増加及び暴露レベルの上昇と共に、TTS も増加する傾向がみられる。式 (2.1) を用いて重回帰分析を行った結果は、以下の通りである。

テスト周波数: 3 kHz

$$\text{自由音場} : \text{TTS} = 0.63(S - 43.3) \log_{10} T - 0.54S + 23.5 \quad (R = 0.899) \quad (2.2)$$

$$\text{拡散音場} : \text{TTS} = 0.79(S - 42.2) \log_{10} T - 0.58S + 23.9 \quad (R = 0.964) \quad (2.3)$$

テスト周波数: 4 kHz

$$\text{自由音場} : \text{TTS} = 1.05(S - 42.3) \log_{10} T - 0.57S + 22.9 \quad (R = 0.944) \quad (2.4)$$

$$\text{拡散音場} : \text{TTS} = 1.13(S - 40.9) \log_{10} T - 0.57S + 21.2 \quad (R = 0.971) \quad (2.5)$$

テスト周波数: 6 kHz

$$\text{自由音場} : \text{TTS} = 1.07(S - 38.9) \log_{10} T - 0.43S + 15.8 \quad (R = 0.961) \quad (2.6)$$

$$\text{拡散音場} : \text{TTS} = 0.88(S - 39.2) \log_{10} T - 0.24S + 8.1 \quad (R = 0.956) \quad (2.7)$$

テスト周波数: 8 kHz

$$\text{自由音場} : \text{TTS} = 0.95(S - 38.8) \log_{10} T - 0.21S + 6.1 \quad (R = 0.985) \quad (2.8)$$

$$\text{拡散音場} : \text{TTS} = 1.27(S - 42.0) \log_{10} T - 1.02S + 43.1 \quad (R = 0.969) \quad (2.9)$$

ただし、 R は、重相関係数である。これらの重回帰式より分かるように、今回の TTS のデータは、暴露時間の対数と暴露レベルの線形結合を用いてよく表されている。

(3) 音場の相違による TTS の差について

音場の相違による TTS の差は、Fig. 2.12~2.14 から見ると、テスト周波数 3, 4 kHz については、著明ではないが、6 kHz 以上については、自由音場における TTS の方が、同レベル、同時点における拡散音場のそれよりも大きくなり、その差はテスト周波数が高くなると共に増大する傾向がある。このことは、2.2.2.4(2) の式 (2.2)~(2.9) についても同様で、テスト周波数 3, 4 kHz については、各重回帰係数の値は両音場で大差

ないが、6 kHz 以上については、 a , c , d に相当する係数に異同がみられる。

両音場における TTS の間に、統計的に見て差があるかどうかを調べるために、分散分析を行った。因子として、音場(P)、暴露レベル(Q)、暴露時間(R)、被験者(B)を選び、各テスト周波数毎に、4元配置法に基づいて分析した結果を Table 2.2 に示した。

Table 2.2 には、各要因

の自由度(ϕ_1), F 検定

を行う際に分母となる要

因の自由度(ϕ_2), F 検

定を行うための F 値を掲

載しており、有意水準5

%で有意ならば * 印を、

有意水準1%で有意なら

ば ** 印を F 値に付して

表示した。Table 2.2 よ

り分かるように、音場と

いう因子について、有意

差が観測されたのは、テ

スト周波数 8 kHz につ

いてのみで、6 kHz も含

めた他のテスト周波数に

ついては、有意な差は認

められなかった。ただし、

6 kHz については、有意

水準を 10%とした場合には、有意な差となった。この点は、Fig. 2.12~2.15 や式(2.2)~(2.9)に見られる傾向と同様である。

次に、有意差の観測されたテスト周波数 8 kHz の場合について、音場差は暴露レベルに換算した場合、どの程度に相当するかについて検討した。具体的には、次式に示すような TTS の増大の式を用いて、両音場における TTS のデータについて、重回帰式を求めた。

Table 2.2 Results of analysis of variance for each test frequency.

Source of variation	D. F.		F-value for each test frequency			
	ϕ_1	ϕ_2	3 kHz	4 kHz	6 kHz	8 kHz
P	1	9	0.46	1.21	4.46	14.55**
Q	3	27	4.54*	21.18**	20.16**	16.45**
R	3	27	6.99**	19.38**	29.34**	31.55**
P × Q	3	27	1.23	0.31	0.53	2.16
Q × R	9	81	4.99**	6.53**	8.08**	6.12**
R × P	3	27	0.71	1.97	0.72	0.59
P × Q × R	9	81	0.82	1.11	0.66	0.70
B	9	81	19.08**	52.59**	78.50**	97.52**
P × B	9	81	4.02**	14.30**	5.80**	7.06**
Q × B	27	81	12.44**	13.00**	9.52**	11.50**
R × B	27	81	2.33**	3.20**	2.34**	2.16**
P × Q × B	27	81	5.32**	5.29**	5.03**	3.46**
Q × R × B	81	81	1.05	1.64*	0.65	1.38
R × P × B	27	81	1.49	1.05	1.47	1.76*

P: Sound field, Q: Exposure level, R: Duration of exposure, B: Subject

*: $\alpha < 0.05$, **: $\alpha < 0.01$

$$TTS = a \{ (S + e \delta) - b \} \log_{10} T + c (S + e \delta) + d \quad (2.10)$$

ただし, S : 暴露音のスペクトルレベル (dB)

T : 暴露時間 (min)

δ : 自由音場では $\delta = 1$, 拡散音場では $\delta = 0$

a, b, c, d, e : 定数

式(2.10)は, 式(2.1)と比較すると分かるように, 自由音場における暴露レベルを, e dB だけ平行移動して減少させると, 両音場における TTS の増大が等しくなるという仮定に基づいている。この式(2.10)へのデータの当てはめは, 非線形の最小二乗法を用いて行い, 以下のような結果を得た。

$$TTS = 1.03 \{ (S + 2.7 \delta) - 41.5 \} \log_{10} T - 0.50 (S + 2.7 \delta) + 19.8 \quad (2.11)$$

つまり, 自由音場用マイクロホンで測定して, 同一の暴露レベルの騒音を用いた暴露実験では, 拡散音場において, 自由音場における TTS と, 等価な TTS を得るためには, そのレベルに 2.7 dB を加えればよいことになる。ただし, 拡散音場において, 拡散音場用マイクロホンを用いてレベル設定を行った場合には, Fig. 2.6 から分かるように, その数値は大きくなることが推測される。

KEMAR マネキンを用いた音場測定から得られた音場差のデータ(2.2.1)と比較してみると, テスト周波数 3, 4, 6 kHz については, 2.2.1.3(3)より, それぞれ -0.9 , -0.8 , -1.3 dB という小さな値が与えられており, 有意な音場差が認められなかった今回の暴露実験の結果とは, 矛盾しないものと言える。しかし, テスト周波数 8 kHz については, 2.2.1.3(3)では 0.8 dB という値であり, 式(2.11)から得られた 2.7 dB より小さくなる。だが, この点については, 2.2.1.3(3)における数値の算出の根拠となっている TTS の臨界帯域の推定¹⁷⁾に採用された実験の被験者と, 今回のそれとが異なること, 及び上記の推定がある程度の幅をもって与えられていることを勘案すれば, 矛盾しない結果だといえる。つまり, テスト周波数 8 kHz の TTS の臨界帯域について言えば, その中心周波数(4950 Hz)の 95%信頼限界幅の上限值は 5980 Hz, 下限値は 4450 Hz であり, また, 帯域幅も 95%信頼限界と共に 33.3 ± 0.8 dB という形で与えられており¹⁷⁾, 仮に中心周波数が, 信頼限界の上限值付近にあるものとする, Fig. 2.6 から分かるように, 2.2.1.3(3)における数値は約 3 dB となり, 今回の実験結果ともよく一

致することになる。

ここで、自由音場で行われた TTS 実験と、拡散音場で行われたそれとの、結果を比較する際に留意すべき点について、今回の音場測定及び騒音暴露実験から得られた知見をまとめると、以下の様になる。両音場共に、自由音場用マイクロホンを用いて、音場のレベル設定を行い、自由音場における暴露を暴露耳への垂直入射とした場合には、テスト周波数 3, 4, 6, 8 kHz の TTS については、ほぼ等価なものとして取り扱うことができる。ただし、6 kHz 以上の TTS については、同一暴露レベルでは、自由音場における TTS の方が拡散音場のそれよりも大きくなる可能性はあるが、これは、被験者の特性等によって、かなり左右されるので、定量的な補正値の導出は、今後の検討に待ちたい。テスト周波数 2 kHz 以下の TTS については、今回は、暴露レベルが低かったため、暴露実験のデータによる裏付けは得られなかったが、マネキンによる測定結果から見ると、自由音場の方が鼓膜前面相当部分の音圧レベルが 2~3 dB 高くなると推測される。これは、拡散音場において、いずれの音場用のマイクロホンを用いても大差はないであろう。

2.3 非騒音暴露時における聴力域値の変動に関する検討

2.3.1 被験者

被験者には男子学生 5 名(年齢 20~23 歳)を採用した。各被験者の聴力域値は 0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4, 6, 8 kHz における両耳の ISO (1964)¹⁹⁾ 基準の聴力レベル (hearing level) で 20 dB 以下である。

2.3.2 装置及び実験手順

午前 10 時ないし 11 時から翌日の同時刻に至るまで、24 時間にわたり、1 時間毎に 5 名の被験者の域値を測定した。

域値の測定は、京都大学衛生工学教室に設置された防音無響室(前掲)内において、自記オーディオメータ(前掲)を用い、設定条件及び域値の決定方法は 2.2.2.3(2) と全く同様である。テスト周波数は、0.5, 1, 2, 4, 6, 8 kHz である。

レシーバ(前掲)の出力音圧の校正もまた同様に行った。

被験者は、域値の測定中以外は防音無響室横の控室に待機させ、また両耳に耳栓を着用させ、騒音に暴露される機会を可能な限り避けるように努めた。被験者の摂取するものは

弁当、茶菓をはじめ日常飲食するものであり、喫煙と飲酒は禁止した。また睡眠も禁じた。

2.3.3 実験結果および考察

各被験者の域値の変動を、テスト周波数をパラメータとして Fig. 2.16～2.20 に図示した。また5名の平均値についても、同様に Fig. 2.21 に図示した。図より分かるように、いずれの被験者のいずれのテスト周波数においても、域値はある範囲内で変動するが、時間経過に伴う域値の有意な上昇は認められない(有意水準5%)。従って被験者を長時間にわたって拘束することにより域値が上昇することはないと考えられる。

むしろ、域値が小さくなる傾向が認められるケースが見られた。これについては、実験開始前までに生じていた TTS が、実験中に回復していった可能性が考えられる。この意味からすると、長時間騒音暴露実験を行う上では、実験を行うその前日頃から、被験者の騒音暴露を極力避けて聴力を管理しておく必要があるものと思われる。

なお参考のため各被験者の域値を付録に示した(Table A.1～A.5)。

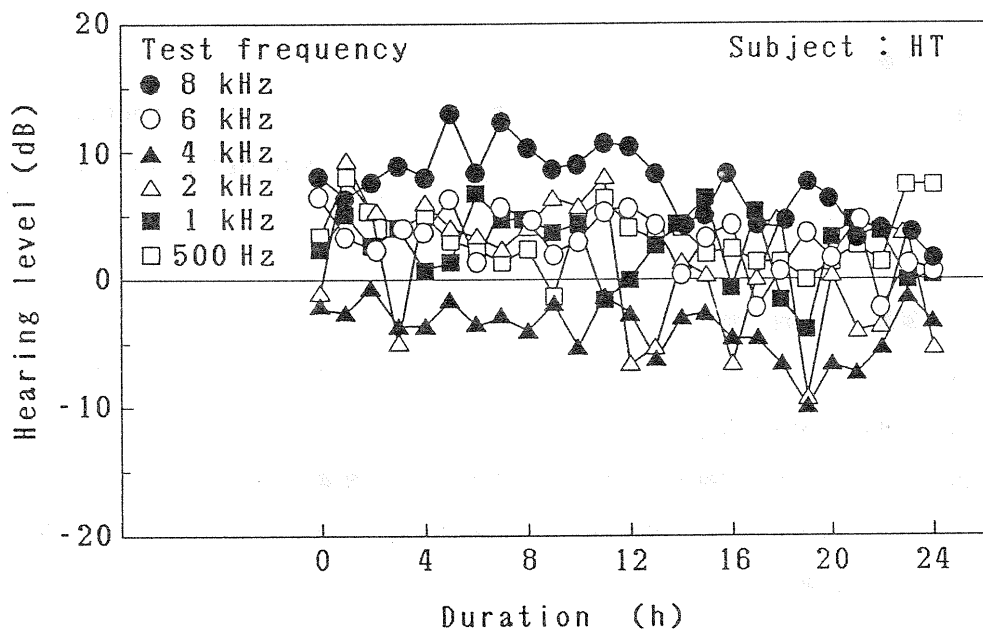


Fig. 2.16 Individual threshold measured in the experiment.

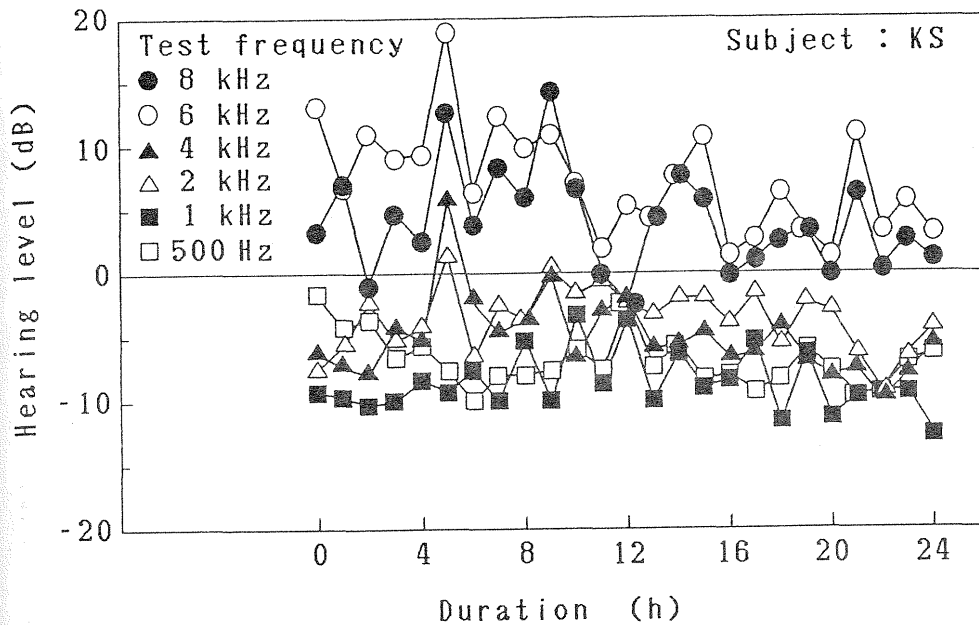


Fig. 2.17 Individual threshold measured in the experiment.

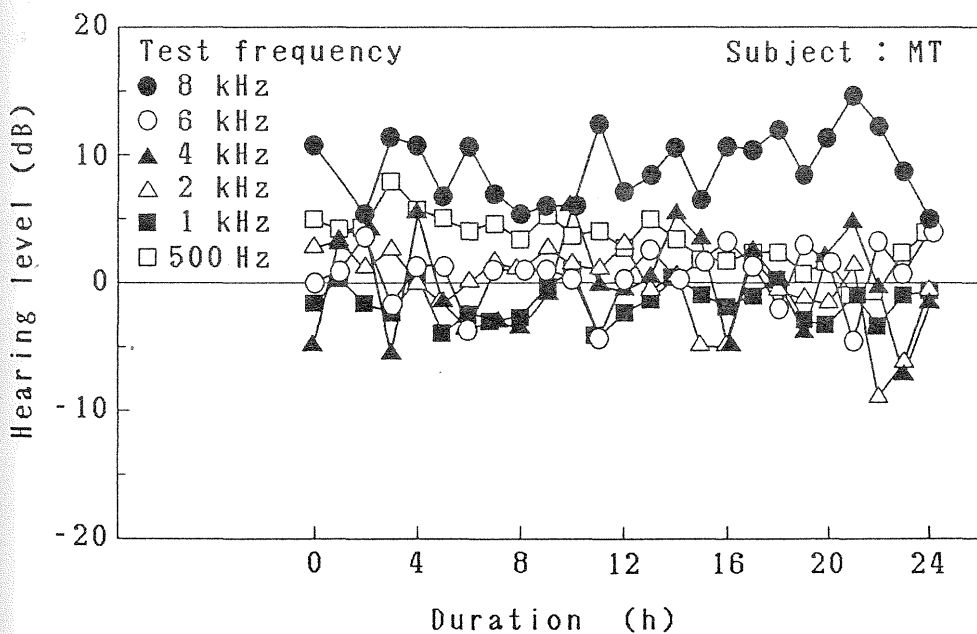


Fig. 2.18 Individual threshold measured in the experiment.

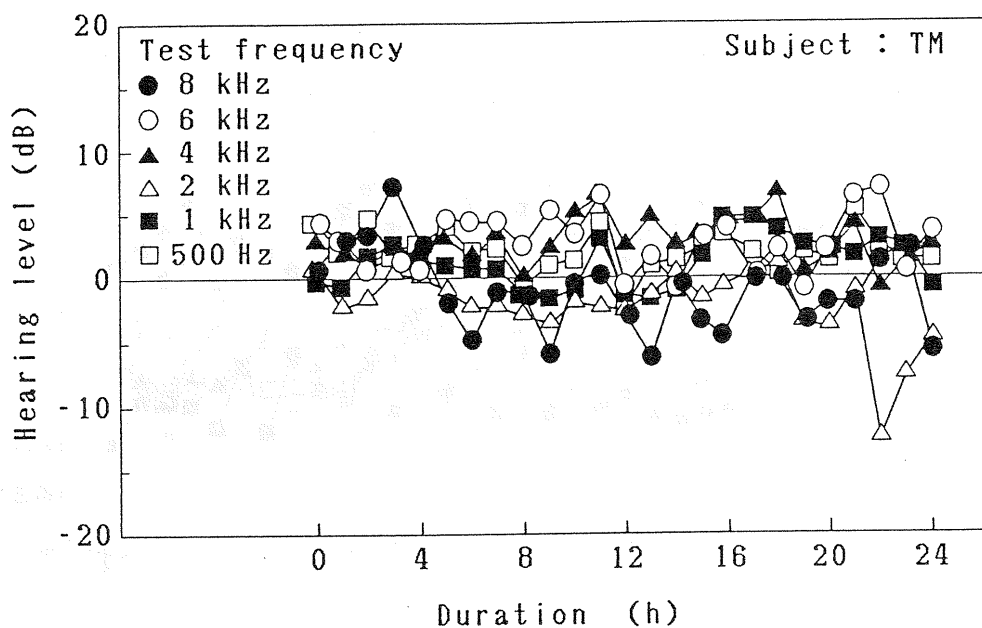


Fig. 2.19 Individual threshold measured in the experiment.

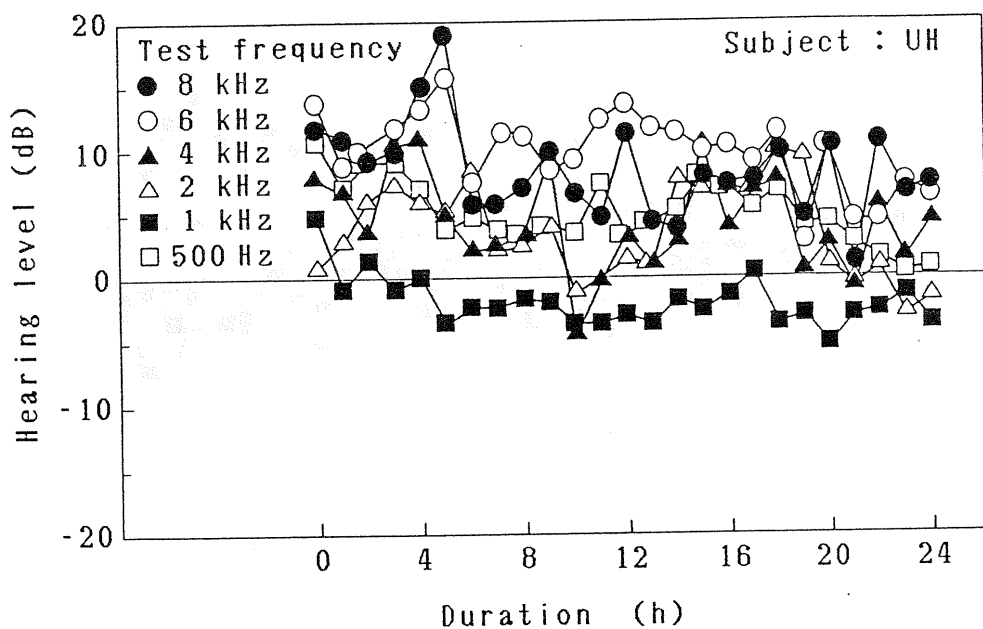


Fig. 2.20 Individual threshold measured in the experiment.

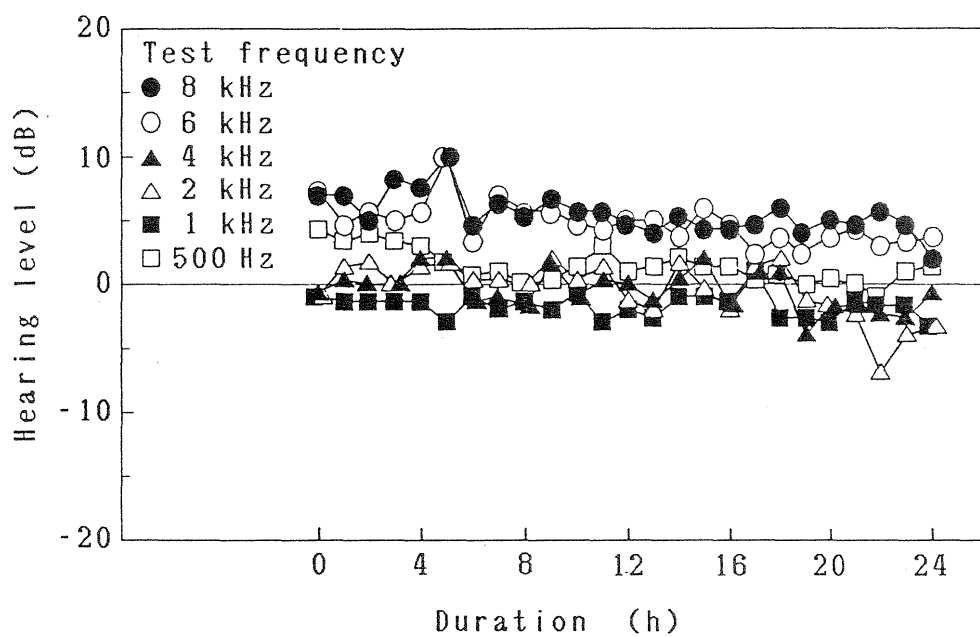


Fig. 2.21 Average threshold over five subjects in the experiment.

2.4 結論

2.3.1 では、被験者の鼓膜前面における音圧レベルを推定する目的で、自由音場(無響室)と拡散音場(残響室)における音圧レベル変換特性について、音響測定用に設計された KEMAR マネキンを用いて、測定・比較を行った。さらに、2.3.2 では、2.3.1 の結果を受けて、2つの音場において、同一被験者に同一騒音を幾つかの条件にて暴露し、TTS を測定した。

その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 自由・拡散両音場において、それぞれに応じた特性を持つマイクロホンを用いて、音場音圧レベルを設定した場合には、マネキンの音圧レベル変換特性は、自由音場の方が、拡散音場のそれを 0.25~8 kHz の周波数領域で上回る。特に、4~8 kHz の間において顕著で、3~9 dB 程度の差が生じる。

(2) いずれの音場においても、自由音場用マイクロホンを用いて、音場音圧レベルを設定した場合には、マネキンの音圧レベル変換特性の差は、0.25~1.6 kHz の低い周波数帯域では、(1)の場合と異ならないが、4~8 kHz の高い周波数帯域では、-1~3 dB 程度まで小さくなる。

(3) テスト周波数 2 kHz における TTS は、今回の条件(暴露レベル 80~89 dB SPL・暴露時間 60 min)では、有意なものは認められなかった。テスト周波数 3, 4 kHz については、自由・拡散両音場における TTS の増大の間には差は認められなかったが、テスト周波数 8 kHz については、両者に有意な差があり、その値は暴露レベルに換算して、2.7 dB 相当分だけ、自由音場における TTS が拡散音場におけるそれを上回った。また、6 kHz についても、有意水準 5%では有意差が認められなかったが、8 kHz と同様な傾向が見られた。

(4) (1)~(3)の結果より、次のように言うことができる。自由・拡散両音場において、自由音場用マイクロホン(IEC, JIS 規格)を用いた音場測定の結果が等しければ、鼓膜前面の音圧レベル、ひいては内耳への dose (暴露量)は、いずれの音場においても、同程度とみなしうる。

(5) ただし、上記(1)~(4)の記述は、自由音場における暴露が、暴露耳を音源の方向に向けて一致させている場合に関するものである。

また 2.3 においては、被験者の聴力域値を、24 時間にわたり 1 時間毎に測定し、長時間の拘束によっても、域値が有意に上昇しないことを確認した。

参考文献

- 1) 庄司 光, 山本剛夫, 高木興一, “オクターブバンド騒音による TTS の研究,” 音響学会誌, 22, 340-349 (1966).
- 2) W.D. Ward, A. Glorig and D.L. Sklar, “Dependence of temporary threshold shift at 4 kc on intensity and time,” J. Acoust. Soc. Am., 30, 944-954 (1958).
- 3) 山本剛夫, 高木興一, 平松幸三, 山野 啓, “航空機騒音による TTS,” 日本公衛誌, 22, 289-296 (1975).
- 4) 岡田 諄, 海保葉子, 内藤丈士, 長尾まゆみ, 石井美香子, 中村賢二, 大藤周彦, 吉田吉紀, 佐藤 茂, “騒音暴露による TTS について,” Audiol. Jpn. 20, 247-259 (1977).
- 5) W.D. Ward, E.M. Cushing and E.M. Burns, “TTS from neighborhood aircraft noise,” J. Acoust. Soc. Am. 60, 182-185 (1976).
- 6) E.A.G. Shaw, “Transformation of sound pressure level from the free field to the eardrum in the horizontal plane,” J. Acoust. Soc. Am., 56, 1848-1861 (1974).
- 7) 高木興一, “産業騒音の許容値に関する研究,” 京都大学工学博士論文 (1968).
- 8) IEC, “Sound Level Meters,” IEC 651 (1979).
- 9) ANSI, “American National Standard Specification for Sound Level Meters,” ANSI S1.4 (1971).
- 10) P.V. Brüel, “Sound level meters—The atlantic divide,” Noise Control Eng. J., 20, 64-75 (1983).
- 11) 日本工業規格, “普通騒音計,” JIS C1502 (1977).
- 12) M.D. Burkhard and R.M. Sachs, “Anthropometric manikin for acoustic research,” J. Acoust. Soc. Am., 58, 214-222 (1975).
- 13) D.D. Dirks and S. Gilman, “Exploring azimuth effects with an anthropometric manikin,” J. Acoust. Soc. Am., 66, 696-701 (1979).
- 14) J.J. Zwislocki, “An ear-like coupler for earphone calibration,” Rep. LSC-S-9, Lab. Sensory Commun., Syracuse Univ. (1971).

- 15) R. J. Maxwell and M. D. Burkhard, "Larger ear replica for KEMAR manikin," J. Acoust. Soc. Am., 65, 1055-1058 (1979).
- 16) G. F. Kuhn, "The pressure transformation from a diffuse sound field to the external ear and to the body and head surface," J. Acoust. Soc. Am., 65, 991-1000 (1979).
- 17) T. Yamamoto, K. Takagi, H. Shoji and H. Yoneda, "Critical band with respect to temporary threshold shift," J. Acoust. Soc. Am. 48, 978-987 (1970).
- 18) ISO, "Relation between sound pressure levels of narrow bands of noise in a diffuse field and in a frontally-incident free field for equal loudness," ISO Recommendation R454 (1965).
- 19) ISO, "Standard reference zero for the calibration of pure-tone audiometers," ISO Recommendation R389 (1964).
- 20) K. Takagi, T. Yamamoto and H. Shoji, "Permissible noise criteria for hearing conservation," 7 th Int. Cong. Acoust. Budapest, 25S2, 777-780 (1970).

第3章 24時間白色騒音暴露による TTSの実験的研究

3.1 はじめに

第1章でも述べたように、16時間以上の長時間に及ぶ騒音暴露実験については、これまでに幾つか報告がある。主なものを Table 3.1 に、その実験条件と共に整理して示した^{1)~11)}。これらの研究者はいずれも TTS が暴露開始後8~12時間で飽和状態に達し、それ以後増加しないことを見出し、その値を漸近域値移動 (asymptotic threshold shift; ATS) と呼称している。また、この ATS と暴露音のレベルとは、ある範囲内では直線関係にあり、その傾きの値として 1.6~2.0 dB を報告している。しかし、これらの研究においては、使用された暴露音の種類は非系統的で、また、暴露レベルの段階数も寡少にすぎるため、騒音の聴力に対する影響評価および TTS の増大の式の決定に用いるにはなお不十分であると言わざるを得ない。

以上の点を考慮して、低レベル広帯域定常騒音を数段階のレベル範囲で、24時間にわたって被験者に暴露し、継続的に TTS を測定した。

3.2 実験方法

3.2.1 被験者

被験者には、男子学生 10 名 (年齢 21~24 歳) を採用した。各被験者の聴力の域値は 0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4, 6, 8 kHz の各テスト周波数において ISO (1964)¹²⁾ 基準の聴力レベル (hearing level) で 20 dB 以下である。10 名の被験者の選定にあたっては、単に聴力が正常であるということだけでなく、オーディオメトリに習熟し、かつ域値が安定しているという点にも留意した。被験者は、実験内容をよく知っており、実験に参加することに対する報酬を受けた。

Table 3.1 Experimental conditions used in the long duration noise exposure by different workers.

Reference	Exposure noise	Exposure level	Exposure time (h)	No. of subjects
Mills, <i>et al.</i> (1970) ¹⁾	Octave band noise ($f_c = 0.5$ kHz)*	81.5, 92.5 dB SPL	29, 5, 48	1
Melnick (1974) ²⁾	Octave band noise (300~600 Hz)	80~95 dB SPL	16	10
Ward (1975) ³⁾	Octave band noise ($f_c = 4$ kHz)	75~85 dB SPL	24	5
Melnick (1977) ⁴⁾	Octave band noise ($f_c = 4$ kHz)	80, 85 dB SPL	24	9
Barry & Bilger (1977) ⁵⁾	Octave band noise ($f_c = 0.5, 2$ kHz)	80, 90 dB SPL	24	5
Stephenson, <i>et al.</i> (1978) ⁶⁾	Pink noise	85 dBA	24, 48	unknown
Bennet, <i>et al.</i> (1978) ⁷⁾	Wide band noise	85 dBA	16	unknown
Melnick (1979) ⁸⁾	Pink noise	76~85 dBA	24	10
Mills, <i>et al.</i> (1979) ⁹⁾	Octave band noise ($f_c = 0.5, 1, 2, 4$ kHz)	75~88 dB SPL	16, 24	3~12
Mills, <i>et al.</i> (1981) ¹⁰⁾	Wide band noise	76~91 dBA	8, 24	6~15
Mills, <i>et al.</i> (1983) ¹¹⁾	Octave band noise ($f_c = 63, 125, 250$ Hz)	84, 90 dBA	8, 24	7~8

* f_c : Center frequency

3.2.2 実験手順

3.2.2.1 暴露方法

暴露騒音には、ランダム雑音発生装置(B & K, 1027)より発生させた白色定常騒音をイコライザ(General Radio, 1925)に通し、0.9 kHz 以下及び 9 kHz 以上の成分を遮断した広帯域騒音を使用した。この周波数帯域は、テスト周波数 2~8 kHz における TTS の臨界帯域¹³⁾を包含する。暴露レベルは、オーバーオール音圧レベルで 65, 70, 75, 80, 83, 86 dB の6条件とした。それぞれの場合のスペクトルレベルは 27, 32, 37, 42, 45, 48 dB となる。暴露レベルの選定にあたっては、米国環境保護庁(EPA)が、暴露年数 40 年の場合、テスト周波数 4 kHz における PTS を実質的に全ての人において 5 dB 以下に止めることができる定常騒音のレベルとして、65 dBA を推定していること¹⁴⁾、及び上記 TTS の増大の式から推測すれば、暴露レベル 86 dB の場合にも 24 時間暴露後の TTS の平均値をいずれの周波数においても 25 dB 以下に止めうると期待されることを勧告した。暴露騒音は増幅器(TEAC, AB-200)で所定のレベルに調整した後、均一な騒音分布が得られるように配置された4個の無指向性スピーカ(Victor, GB-100)より暴露室内に放射した。

実験に使用された暴露室は、大阪府公害監視センターに設置された残響室である。残響室には拡散板が吊るされており、室内空間の体積は 101 m³、拡散板を含む壁面の表面積は 175 m² である。部屋の残響時間を、室内に何も搬入していない場合、リクライニングチェア、テーブルなどを搬入した場合、更に被験者を入室させた場合の3条件について、室内 12 地点で測定した結果が Fig. 3.1 である。測定は 1/3 オクターブバンドノイズを用いて、中心周波数 63 Hz から 16 kHz までの範囲で行った。室内 16 地点における暴露音の 1/3 オクターブバンド分析結果を Fig. 3.2 に示した。この場合の測定は、室内には家具を設置しているが、被験者の聴力保護のため被験者のいない空室の状態で行っている。Fig. 3.1 の残響時間より試算したところ、被験者が入室した場合、1 kHz から 8 kHz の周波数範囲で 0.7~1.0 dB のレベル低下が推定されたが、スペクトルの形には大きな変化はないと考えられる。

Fig. 3.1 に示すようにこの残響室は高周波成分の残響時間が短く、室内は完全な拡散音場ではないが、音圧レベルの分布の標準偏差は 1 dB 未満であり(Fig. 3.2)、音場はほぼ均一とみなすことができる。従って、室内での被験者の位置によって、暴露音の特性が異なることはないと考えられる。

実験中は、常時、マイクロホン(B & K, 4145, 2619, 2606)を設置しておき暴露音のレベルを監視した。

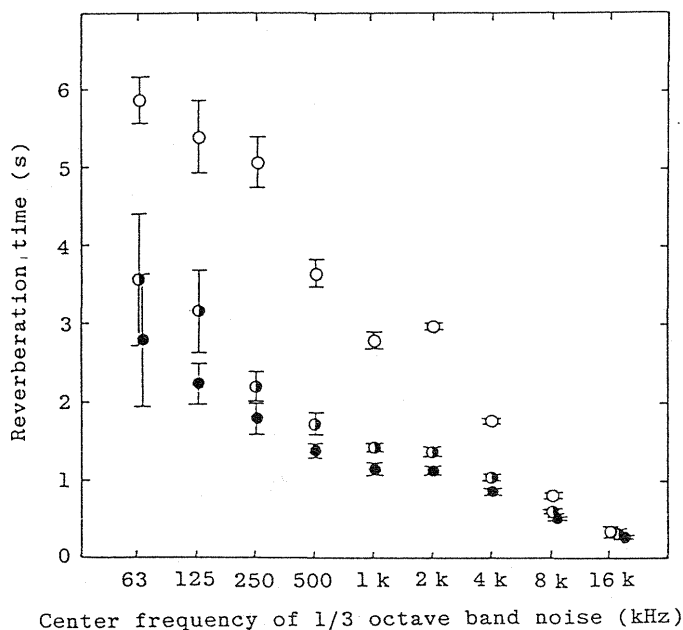


Fig. 3.1 Reverberation time of the room used for exposure. Data are the arithmetic means of 12 measuring points in the room. Vertical bars show standard deviations. Open circles indicate the measurement without furniture, semi-solid circles indicate that with furniture and solid circles indicate that with furniture and subjects.

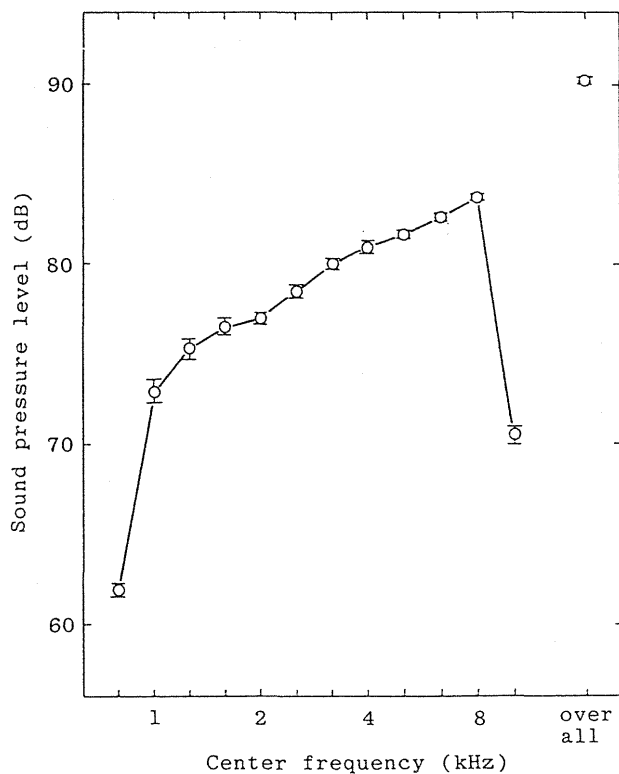


Fig. 3.2 One third octave band analysis of the exposure noise. Each point shows the mean of 16 measuring points in the room. Vertical bars show standard deviations.

暴露時間は 24 時間で Fig. 3.3 に示すように暴露開始後 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 20, 22, 24 時間の時点でそれぞれ域値の測定を行った。域値の測定に伴う暴露の中断時間は、1 回につき 5 min 又は 10 min で、合計 85 min である。この中断時間は暴露時間には算入していない。

暴露は残響室内で 3 ないし 5 名の被験者に対し、同時に行った。

被験者は、暴露開始前の域値を測定した後、被験者ごとに 5 min ずつずらして残響室に入れ、騒音に暴露した。室内では、リクライニングチェアなどに腰掛けさせ、楽な姿勢をとらせた (Fig. 3.4)。室内の音場はほぼ均一とみなしうるが、念のため時宜被験者にその位置を移動させた。

被験者の摂取するものは弁当、茶菓をはじめ日常飲食するものであり、喫煙と飲酒は禁止した。また、睡眠は暴露開始後 14 ~ 20 時間の間にとらせるようにした。

暴露は被験者の片耳 (右耳) について行い、対耳 (左耳) には終始耳栓 (Marison Health and Safety, DECI DAMP) を着用させた。また、被験者は暴露実験を行う前日から実験施設の近くの宿舎に滞在し、耳栓を着用するなどして、可能な限り騒音暴露の機会を避けるようにした。

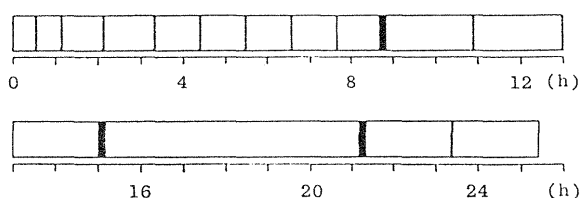


Fig. 3.3 Schematic schedule of noise exposure.

Open area represents noise exposure, and solid area represents 5-min-off-time or 10-min-off-time for audiometry. Total exposure time is 24 h. Sum of the off time for audiometry is 85 min.

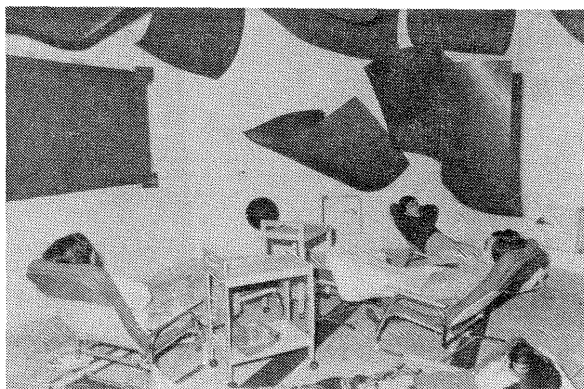


Fig. 3.4 A view of inside reverberant room.

3.2.2.2. 域値の測定

域値の測定は、残響室に隣接した無響室内において自記オーディオメータ(永島医科器械, A60-C)を用い、固定周波数・断続音(断続の周波数 2 Hz)・レベルの減衰速度 2 dB/s の条件に設

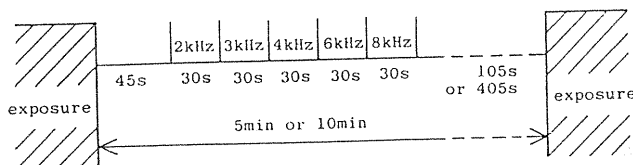


Fig.3.5 Schematic schedule of audiometry.

定して行い、上昇法・下降法の平均値(鋸歯状曲線の上下端値の平均値)を域値とした。

レシーバ(Telephonics, TDH-39, MX41/AR クッション付)の出力音圧は人工耳(B & K, 4153)及び精密騒音計(B & K, 2203)を用いて校正した。

暴露実験開始前に、まず両耳の 0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4, 6, 8 kHz の域値を測定し、次に左耳に耳栓を装着後 30 min で再び右耳の 2, 3, 4, 6, 8 kHz の域値を測定し、これを開始前域値とした。暴露中は Fig. 3.5 に示すように暴露中断 45 s 後から 30 s ごとに、順に 2, 3, 4, 6, 8 kHz の測定を行った。暴露終了 τ min の時点における TTS を TTS_{τ} と記す慣例に従えば、各々 TTS_1 , $TTS_{1.5}$, TTS_2 , $TTS_{2.5}$, TTS_3 を測定したことになる。

3.2.3 対照実験

第2章 2.3 において、騒音を暴露せずに 24 時間に渡り、被験者の域値を測定した。その結果、長時間にわたって被験者を拘束しても、時間の経過に伴う域値の有意な上昇は認められなかった。しかし、数 dB の範囲内で域値は変動するので、8 時間を越えるような長時間騒音暴露実験を行う上で、実験前の 1 回限りの域値測定をもって、暴露前域値とするよりも、その被験者の騒音非暴露時の平均的な域値をそれに充てる方が合理的であると考えられる。

そこで、そのようなデータを得るため、今回も対照実験として騒音を暴露せずに 24 時間に渡り、10 名の同一被験者の域値の変動を測定した。居住空間、測定時間、測定周波数などの諸条件は暴露を行う場合と全く同様である。ただし耳栓は両耳に着用して、域値の測定時のみ取り外すようにした。

3.3 実験結果

3.3.1 対照実験

対照実験で得られた10名の域値を、各測定時点ごとに算術平均した値を Fig. 3.6 に示す。縦軸は ISO (1964)¹²⁾ 基準の聴力レベル (hearing level) である。今回もいずれのテスト周波数においても、時間の経過に伴う域値の平均値の有意な上昇は認められなかった (有意水準 5%)。従って、被験者を長時間にわたって拘束することにより、域値が上昇しないことがここでも立証された。

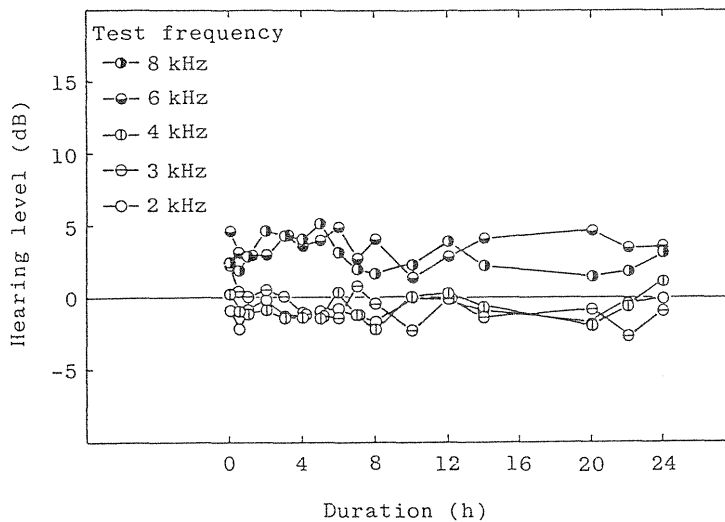


Fig.3.6 Average threshold measured in the control experiment.

Circles indicate the mean values of hearing level (ISO) over ten subjects.

3.3.2 TTS の増大

TTS は暴露後の域値から暴露前のそれを差し引いた値として表すが、今回のように、1回の暴露が長時間に及び、かつ数回にわたる一連の実験を遂行するために相当長期間を要する場合には、前述したように、各暴露実験前の1回限りの域値測定をもって、暴露前域値とするよりも、その被験者の騒音非暴露時の平均的な域値をそれに充てる方が合理的であると考えられる。従って6個の開始前域値と、対照実験で得られた16個の域値と

の、計 22 個の平均値を暴露前域値とした。

各テスト周波数における 10 名の TTS の平均値 (以下 TTS は特に断らない限り 10 名の平均値をさす)の時間的変動を Fig. 3.7~3.11 に示した。

テスト周波数 2 kHz (Fig. 3.7)についてみると TTS の値は小さく、暴露レベルによって顕著な差が認められない。しかし暴露時間が8時間を越えた場合においては、暴露レベルが 65 dB SPL もしくは 70 dB SPL で、かつ暴露時間 22 時間の場合を除いて有意な TTS が生じた(ここで有意な TTS とは暴露前域値と暴露後域値の平均値間に、有意水準 5% で有意差が認められることを言う。以下同様)。

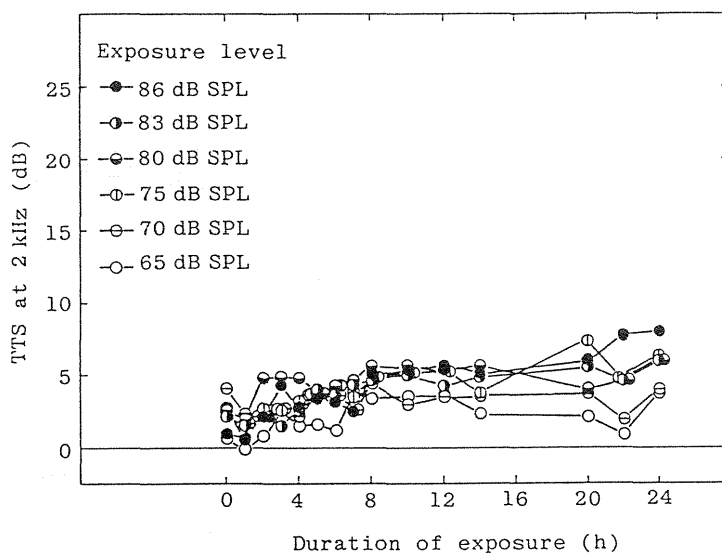


Fig. 3.7 Growth of TTS at 2 kHz. TTSs are the mean values over ten subjects.

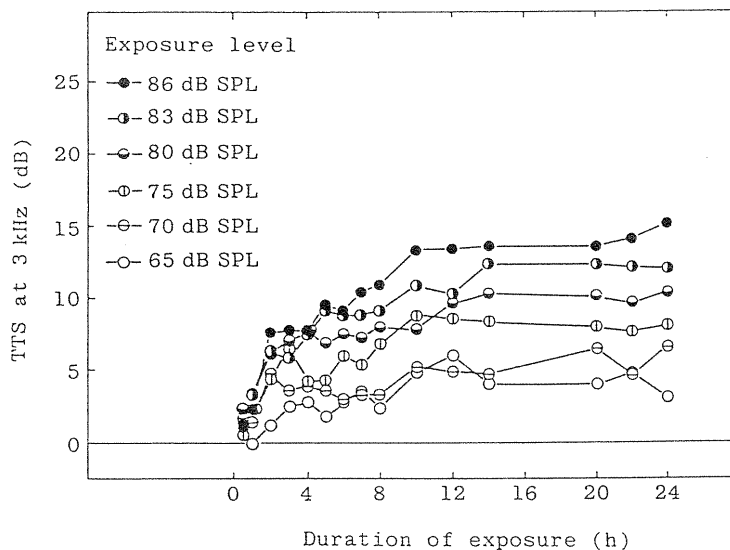


Fig. 3.8 Growth of TTS at 3 kHz. TTSs are the mean values over ten subjects.

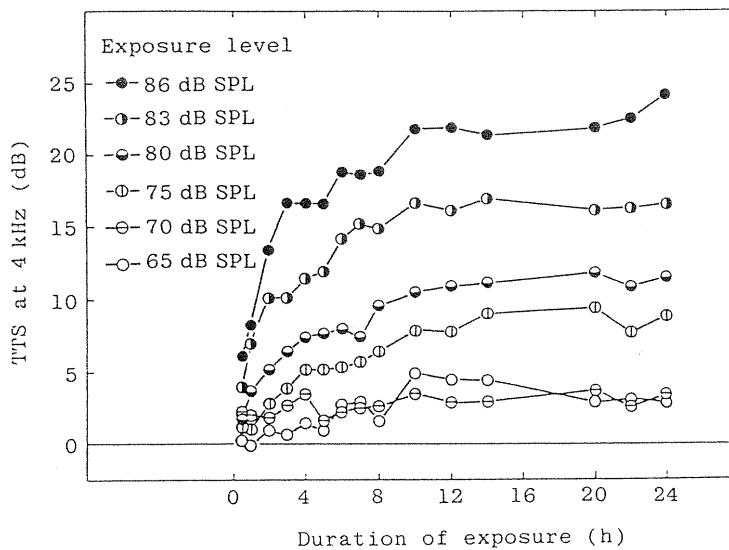


Fig. 3.9 Growth of TTS at 4 kHz. TTSs are the mean values over ten subjects.

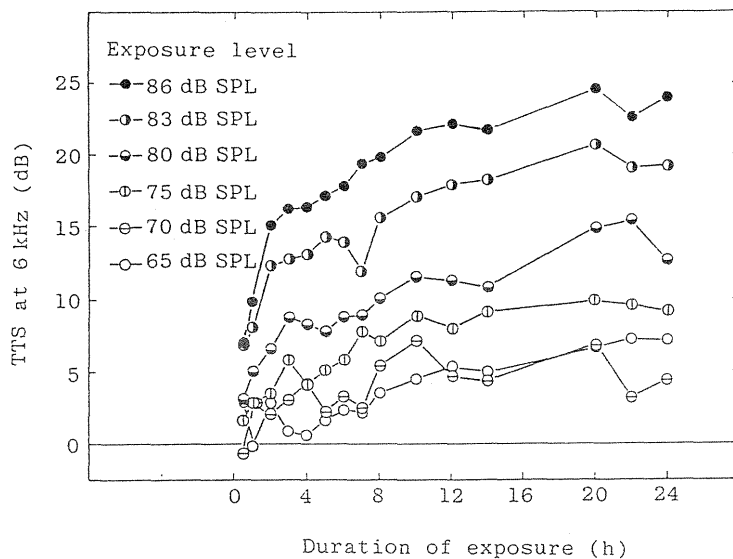


Fig. 3.10 Growth of TTS at 6 kHz. TTSs are the mean values over ten subjects.

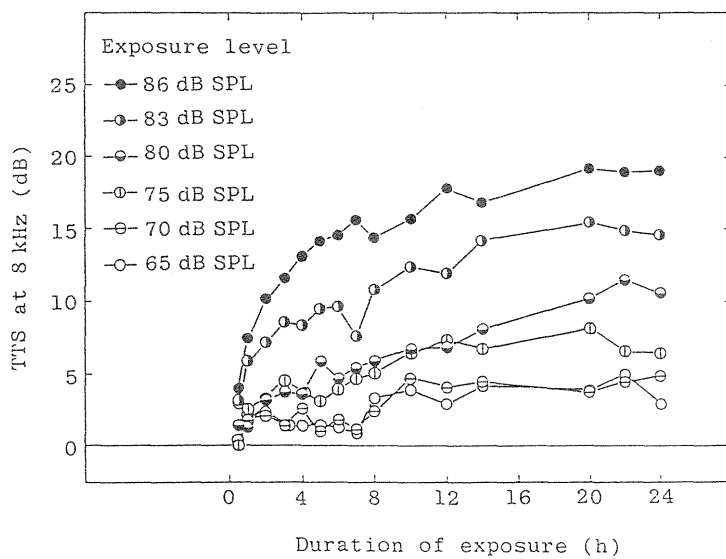


Fig. 3.11 Growth of TTS at 8 kHz. TTSs are the mean values over ten subjects.

テスト周波数 3, 4, 6, 8 kHz (Fig. 3.8~3.11) については、TTS の値自体は異なるが、増大曲線 (growth curve) の形は似通っている。すなわち、TTS は暴露開始と共に増大し、暴露時間 8 時間前後で増加傾向が鈍化し、それ以降では TTS はほぼ一定か、増大してもその増加量は大きくない。また、75 dB SPL 以上の暴露レベルでは、レベルの増加に伴い TTS の値も増加する。65 dB SPL と 70 dB SPL については、暴露レベルによって著明な差が認められなかった。

しかし、24 時間暴露後の TTS は今回測定した全テスト周波数において、65 dB SPL といった低い暴露レベルをも含めてすべて有意であった。暴露レベルが 65 dB SPL, 70 dB SPL といった低レベルでも暴露時間が 8 時間を越えると、テスト周波数 3, 4, 6, 8 kHz において、TTS の平均値が 5 dB に近く、時に 5 dB を越えることがある。これは前記 EPA¹⁴⁾ の推定したレベル 65 dBA にあってもなお、住民の一部には聴力損失を生じるものが存在する可能性を示唆する。

参考のため、対照実験 及び 暴露実験中 の各被験者の聴力レベルの値を付録に示した (Table A.6~A.15)。

3.3.3 漸近域値移動 (ATS)

漸近域値移動 (以降 ATS と略記する) の値とそのレベルに達するために要する時間については、現在まで幾つかの報告がある^{3), 4), 9)}。しかし、それぞれの値を求める方法は、研究者によって異なり、統一されていない。また、各々の研究者が採用した算出方法の根拠も明記されていない。

そこで今回は、得られた TTS の値に次式を適用し、パラメータの値から ATS の推定値を定義することにする。

$$TTS = K \{1 - \exp(-t/T)\} \quad (3.1)$$

ただし、 K : ATS の推定値 (dB)

t : 暴露時間 (h)

T : 時定数 (h)

この方法により算定した ATS の推定値を縦軸に、テスト周波数を横軸にとり図示したものが Fig. 3.12 である。ただしテスト周波数 2 kHz, 暴露レベル 70 dB SPL の場合については TTS の値がばらつき、式 (3.1) の適用が困難であるため、20 時間から 24

時間までの暴露時間における

TTS の算術平均をもって暫定的にATS の推定値として図中に示した。また、このようにして求めたATS の値を Table 3.2 に示した。図より分かるように暴露レベル 75 dB SPL 以上では、ATS の推定値は、テスト周波数 4 kHz 及び 6 kHz において最大となる。

また、式の上からはTTS がATS のレベルに達するために要する時間は無限大となるので、その代表値として、 K の値の 95 % に達する暴露時間を充てることとする。この値は式 (3.1) から時定数を用

いて $T \ln 20 = 2.966 T$ と表される。Table 3.3 はこの値を整理したものである。

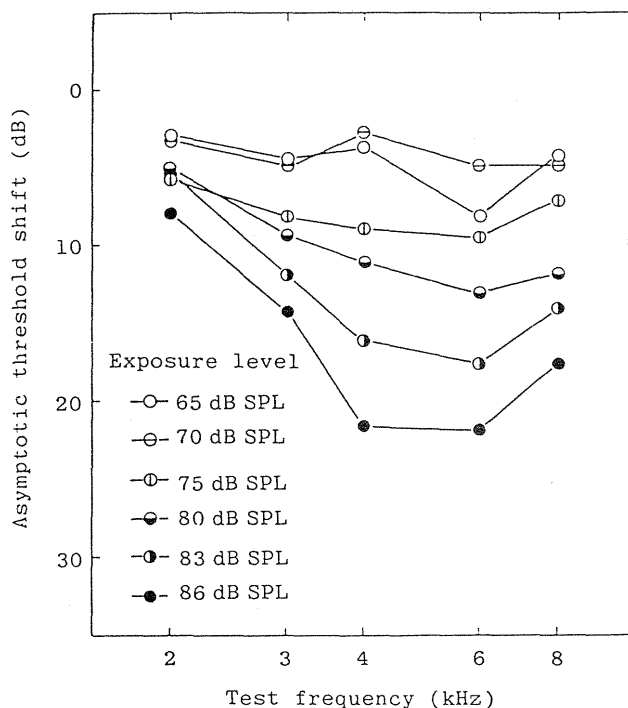


Fig. 3.12 Asymptotic threshold shifts plotted against test frequency.

Table 3.2 Values of asymptotic threshold shift in dB.

Exposure level (dB SPL)	Test frequency (kHz)				
	2	3	4	6	8
65	2.8	4.4	3.7	8.2	4.2
70	...	4.9	2.7	5.0	4.8
75	5.8	8.2	8.9	9.5	7.1
80	5.0	9.4	11.2	13.1	11.9
83	5.4	11.9	16.2	17.5	14.2
86	8.0	14.3	21.6	21.8	17.6

...:TTS data were not fitted by Eq. (3.1).

Table 3.3 Time in hours after onset at which TTS reaches asymptote.

Exposure level (dB SPL)	Test frequency (kHz)				
	2	3	4	6	8
65	9.4	14.6	18.5	46.0	24.1
70	...	7.1	1.6	10.6	24.5
75	14.3	11.6	17.1	14.9	15.5
80	3.2	7.6	12.1	13.4	32.4
83	14.0	12.0	8.1	7.0	13.5
86	28.6	13.6	7.3	6.8	8.4

...:TTS data were not fitted by Eq. (3.1).

テスト周波数 2 kHz・暴露レベル 70 dB SPL の場合については同様な方法で式(3.1)から値を決定することができなかった。表より分かるようにその値は 1.6~46.0 時間の範囲にばらついているが、テスト周波数 4, 6, 8 kHz については暴露レベル 75 dB SPL 以上では、暴露レベルの増加に伴い減少する傾向がみられたが、テスト周波数による差は著明でない。

3.4 考察

3.4.1 TTS の増大

長時間にわたる騒音暴露実験に関する既往の報告^{3), 4), 9)}において、TTS が特定の時間以降 ATS のレベルに達してそれ以上ほとんど増加しないことが報告されている。その時間は、Ward³⁾, Melnick⁴⁾ によると 8~12 時間、また、Mills, *et al.*⁹⁾ によると 8 時間である。今回の実験でも、Fig. 3.7~3.11 から明らかなように、TTS には漸近値(ATS)が存在することが分かる。ATS のレベルに達するまでに要する時間は 1.6~46.0 時間の範囲で大きくばらついているが、TTS の成長曲線が比較的滑らかな条件(テスト周波数 3~8 kHz, 暴露レベル 75 dB SPL 以上)についてみれば、6.8~32.4 時間の範囲であり、かつテスト周波数 4, 6, 8 kHz において暴露レベルの増加に伴い減少する傾向がみられた。しかし、その関係を定量的に把握する実験式を、今回のデータのみに基づいて作成するには、若干無理が伴う。

3.4.2 ATS と暴露レベルとの関係

Mills, *et al.*⁹⁾ は、ATS と暴露レベルとは、特定のレベル以上では直線関係にあると報告し、その傾きとして 1.7 dB/dB という値を与えている。ほかには Ward³⁾, Melnick⁴⁾, Barry and Bilger⁵⁾ もそれぞれ 1.6~2.0 dB/dB, 1.6 dB/dB, 1.7 dB/dB という値を報告している。暴露音の種類が異なるので、今回の成績と他の研究者の成績とを直接比較することは、一般には困難と考えられる。しかしながら、Ward³⁾, Melnick⁴⁾, Mills, *et al.*⁹⁾ らが暴露音として用いた中心周波数 4 kHz のオクターブバンドノイズは、テスト周波数 6 kHz における TTS の臨界帯域¹³⁾ をほぼ包含していると推定されるので、暴露レベルをスペクトルレベルに換算することにより両者を比較することが可能である。

Fig. 3.13 は、テスト周波数 6 kHz における ATS について、今回のデータと共に Ward³⁾、Melnick⁴⁾、Mills, et al.⁹⁾らのデータを図示したものである。ただし Ward³⁾ のデータでは、テスト周波数は 5.6 kHz である。今回得られた ATS の値は、Melnick⁴⁾ や Mills, et al.⁹⁾ の値よりも、Ward³⁾ のそれに近い。このようなデータにおける差の要因としては、民族差、性差、実験者間の差、単なる被験者の差などが考えられるが、いずれであるかは確定しにくい。

また、図中の実線は今回の実験データのうち暴露レベル 70～86 dB SPL (スペクトルレベル 32～48 dB) のデータを用いて求めた回帰直線である。傾きは 1.0 dB/dB であった (相関係数 0.989)。同様に、テスト周波数 3, 4, 8 kHz について求めた傾きの値は、0.55 dB/dB, 1.1 dB/dB, 0.81 dB/dB であった (相関係数はそれぞれ 0.983, 0.978, 0.990)。いずれも Ward³⁾、Melnick⁴⁾、Mills, et al.⁹⁾ の得た値よりも小さい。

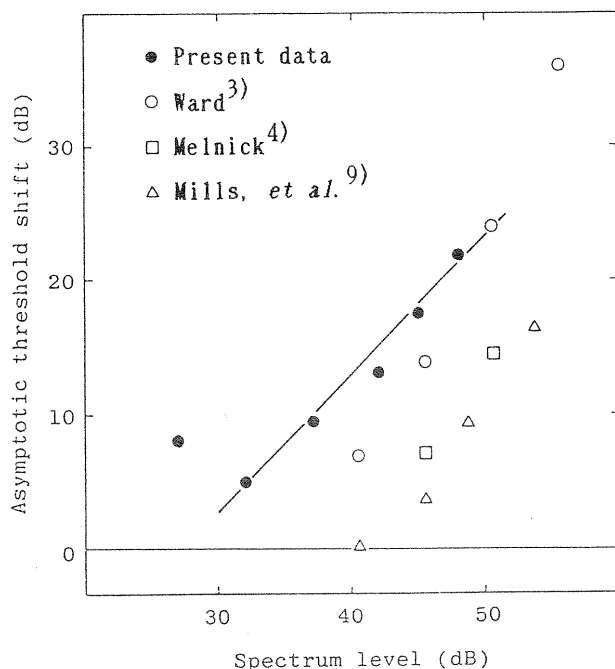


Fig. 3.13 The relation between asymptotic threshold shift at 6 kHz and spectrum level of the exposure noise. Solid line is the best fitted line to the present data. Slope of the line is 1.0 dB/dB.

3.4.3 山本・高木らの TTS の増大の式との比較

山本・高木らは、以前 85, 90, 93, 95 dB SPL の白色騒音を暴露音として、暴露時間 8 時間の騒音暴露実験を行い、0.5, 0.8, 1, 1.5, 2, 3, 4, 6, 8 kHz の TTS の増大の式を求めた¹⁵⁾。Fig. 3.14 は一例として、テスト周波数 4 kHz の場合について、暴露時間 8 時間の場合の今回の TTS の実測値と、山本・高木らが求めた TTS の増大の式¹⁵⁾

から得た値を比較して図示したものである。横軸は暴露レベルをスペクトルレベルで表示してある。図において白丸は今回の成績を、実線は計算値を示す。なお、山本・高木らは 4 kHz の TTS の増大の式を次式で表している。

$$\text{TTS} = 1.36(S - 41.9) \log_{10} t - 0.45S + 18.7 \quad (3.2)$$

ただし、 S : スペクトルレベル (dB)

t : 暴露時間 (min)

スペクトルレベル 48 dB つまりオーバーオール音圧レベル 86 dB SPL では、今回の成績と計算値とがよく一致しているが、それ以下の暴露レベルでは明らかに傾きが異なり、実測値は計算値を上回っている。

この計算値は、上記 TTS の増大の式において暴露レベルと TTS とは直線関係にあると仮定して算出されている。また、スペクトルレベル 47 dB 以下では TTS の増大の式を決定する成績を得た実験条件のスペクトルレベルをはずれ、TTS の計算値は外挿した値に相当する。Fig. 3.14 は、暴露レベルを量、TTS を効果とする、量-効果関係(dose-effect relationship)を表している。TTS に限らず、量-効果関係は、一般に S 字状を呈するといわれるが、Fig. 3.14

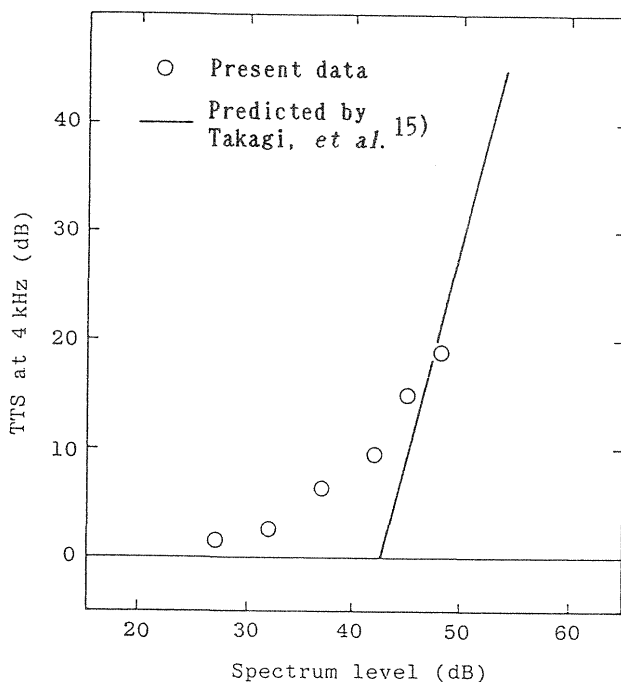


Fig. 3.14 The relation between TTS at 4 kHz after 8 h exposure to noise and spectrum level of noise. The solid line shows the TTS calculated from the equation of TTS growth reported by Takagi, et al.¹⁵⁾.

実験の場合はやむを得ない。また、Mills, *et al.*⁹⁾ も特定のレベル以下では低レベルへ向かって ATS が 0 dB に漸近する曲線を描くことを報告しており、これも同様の現象と考えられる。

以前と今回の両実験条件を比較すると、山本・高木らの実験^{13), 15)} は無響室内での自由音場に近い形での暴露であるのに対し、今回は残響室内での拡散音場に近い形での暴露である。この点については、第2章 2.2 において、自由音場用マイクロホンと備えた騒音計でのレベルのモニタリングで同じ数値を示せば、被験者の鼓膜前面での音響エネルギーは、ほぼ等しくなることが既に判明している。Fig. 3.14 において、両実験データの整合性が良いことも、またこれを裏付けている。

3.5 結論

白色騒音の 0.9 kHz 以下及び 9 kHz 以上の成分を遮断して作成した広帯域定常騒音を、残響室内で 10 名の被験者に 24 時間にわたり暴露した。暴露音のレベルを 65~86 dB SPL の範囲で 6 段階に変化させて、テスト周波数 2, 3, 4, 6, 8 kHz における TTS を被験者の片耳について測定し、以下の結論を得た。

(1) 65 dB SPL という低い暴露レベルでも、24 時間暴露後には 2, 3, 4, 6, 8 kHz の全テスト周波数において、有意な TTS が観測された。

(2) TTS の増大に 1 次遅れ系の指数関数を適用し、飽和値を漸近域値移動 (ATS) とした。テスト周波数 3, 4, 6, 8 kHz において、ATS の値は暴露レベルが 65 dB SPL の場合、それぞれ 4.4, 3.7, 8.2, 4.2 dB、また、暴露レベルが 86 dB SPL の場合、それぞれ 14.3, 21.6, 21.8, 17.6 dB であった。ATS と暴露レベルとは、ほぼ直線関係にあり、その傾斜はテスト周波数 3, 4, 6, 8 kHz についてそれぞれ 0.55, 1.1, 1.0, 0.81 dB であった。

(3) 得られたデータに指数関数を適用し、ATS の 95% に到達する暴露時間をもって、ATS のレベルに達するために要する時間を求めたところ、1.6~46.0 時間の範囲にばらついた。テスト周波数 4, 6, 8 kHz については、暴露レベル 75 dB SPL 以上で、暴露レベルの増加に伴う減少傾向がみられた。テスト周波数による差は顕著でなかった。

(4) 従来の TTS の増大の式による計算値との比較を試みたところ、暴露レベル 86 dB SPL では今回の実測値と計算値とで良い一致をみたが、83 dB SPL 以下のレベルではいずれも実測値が計算値を上回り、暴露レベル(量)と TTS (効果)との量-効果関係が S 字状になることが示唆された。

参考文献

- 1) J.H. Mills, R.W. Gengel, C.S. Watson and J.D. Miller, "Temporary changes of the auditory system due to exposure to noise for one or two days," J. Acoust. Soc. Am. 48, 524-530 (1970).
- 2) W. Melnick, "Human temporary threshold shift from 16-hour noise exposures," Arch. Otolaryngol. 100, 180-189 (1974).
- 3) W.D. Ward, "Studies of asymptotic TTS," Conference No. 171, Proceedings, Aerospace Medical Panel Specialists Meeting, Advisory Group of Aerospace Research and Development (AGARD), NATO, Tronto (1975).
- 4) W. Melnick, "Temporary threshold shift following 24-hour noise exposure," Ann. Otol. Rhinol. Laryngol. 86, 821-826 (1977).
- 5) J.P. Barry and R.C. Bilger, "Asymptotic threshold shift," J. Acoust. Soc. Am. 62(S1), S93 (1977).
- 6) M.R. Stephenson, C.W. Nixon and D.L. Johnson, "Growth and recovery of temporary threshold shifts from 24 hour continuous, 48 hour continuous, and 48 hour intermittent noise exposure," J. Acoust. Soc. Am. 64(S1), S108 (1978).
- 7) T. Bennet, G. Bienvenue, A. Anthony and P. Michael, "Procedures for characterizing certain effects of prolonged noise exposure," J. Acoust. Soc. Am. 63(S1), S64 (1978).
- 8) W. Melnick, "Lower intensity limits of noise which produces measurable TTS following 24-h exposure," J. Acoust. Soc. Am. 65(S1), S117 (1979).
- 9) J.H. Mills, R.M. Gilbert and W.Y. Adkins, "Temporary threshold shifts in humans exposed to octave bands of noise for 16 to 24 hours," J. Acoust. Soc. Am. 65, 1238-1248 (1979).
- 10) J.H. Mills, W.Y. Adkins and R.M. Gilbert, "Temporary threshold shifts produced by wideband noise," J. Acoust. Soc. Am. 70, 390-396 (1981).
- 11) J.H. Mills, J.D. Osguthorpe, C.K. Burdick, J.H. Patterson and B. Mozo, "Temporary threshold shifts produced by exposure to low-frequency noises," J. Acoust. Soc. Am. 73, 918-923 (1983).

- 12) ISO, "Standard reference zero for the calibration of pure-tone audiometers," ISO Recommendation R 389 (1964).
- 13) T. Yamamoto, K. Takagi, H. Shoji and H. Yoneda, "Critical band with respect to temporary threshold shift," J. Acoust. Soc. Am. 48, 978-987 (1970).
- 14) Environmental Protection Agency, "Information on levels of environmental noise requisite to protect public health and welfare with an adequate margin of safety," 550/9-74-004 (1974).
- 15) K. Takagi, T. Yamamoto and H. Shoji, "Permissible noise criteria for hearing conservation," 7th Int. Cong. Acoust. Budapest, 25S2, 777-780 (1970).

第4章 低レベル長時間騒音暴露にまで適用可能なTTSの実験式の検討

4.1 はじめに

山本・高木らのTTSの増大の式¹⁾(以降、従来の式と称する)は、主として、産業騒音暴露による聴力への影響評価を目的として作成されたものであり、暴露時間8時間までの、比較的高レベルの定常騒音暴露に適用し得るものである。ただ、環境騒音のような低レベル長時間暴露にまで、従来の式を適用するには、その導出の基礎となった実験条件(暴露レベル85 dB SPL以上、暴露時間8時間以下)²⁾から見て、幾分無理があると考えられる。暴露レベル83 dB SPL以下の低レベル暴露では、TTSの実測値が従来の式による計算値を上回ることを第3章において既に述べた。従って、環境騒音暴露による聴力への影響を検討するためには、低レベル長時間騒音暴露実験のデータに基づいたTTSの予測式を作成し、それを適用する方が望ましい。また、産業騒音暴露の場合でも、特定のレベル以下となる時間をoff-timeとして無騒音と同様に見なす従来の取扱いよりも、これを低レベルの騒音に暴露されている時間として取扱った方が、より合理的な評価が可能になる。

第3章ではTTSの予測式の応用範囲を拡張する目的で、低レベル広帯域定常騒音を、数段階のレベル範囲において、24時間にわたって被験者に暴露し、継続的にTTSを測定した。さらに、得られたデータと、従来の式の基礎となったデータとの比較のために、騒音暴露の際の音場差が、実験結果に及ぼす影響については、第2章2.2において検討した。

以上の結果に基づいて、低レベル長時間暴露にまで適用可能なTTSの増大の予測式を導出することが、本章の目的である。

これまでにTTSの増大の式として、種々の関数形を当てはめる試みがなされてきた。従来のTTSの増大の式は、暴露レベルと暴露時間の対数との線形結合として、次のような重回帰式で表されている¹⁾。

$$\text{TTS}_2(S, t) = a(S - b) \log_{10} t + cS + d \quad (4.1.1)$$

ただし, TTS_2 : 暴露終了後 2 min 休止時の TTS (dB)

S : 暴露音の TTS の臨界帯域³⁾ の中心周波数におけるスペクトルレベル (dB)

t : 暴露時間 (min)

a, b, c, d : テスト周波数によって異なる定数

TTS の増大を暴露時間の対数の 1 次式とする同様な取扱いは, Ward, et al.⁴⁾ も提案した。

また, TTS には漸近値 (asymptotic threshold shift, ATS) が存在するという仮定の下に, 1 次遅れ系の指数関数を充てる試みも見られた。Mills, et al.⁵⁾ は, 長時間騒音暴露実験の結果に, 次式を当てはめた。

$$\text{TTS}(t) = K \{1 - \exp(-t/T)\} \quad (4.1.2)$$

ただし, K : ATS (定数, dB)

T : 時定数

さらに, Keeler⁶⁾ は, 式 (4.1.2) を組み合わせて, 次式を提案している。

$$\begin{aligned} \text{TTS}(t) = & K_f \{1 - \exp(-t/T_f)\} + K_m \{1 - \exp(-t/T_m)\} \\ & + K_s \{1 - \exp(-t/T_s)\} \end{aligned} \quad (4.1.3)$$

ただし, K_f, K_m, K_s : 定数。 $K_f + K_m + K_s = \text{ATS}$ となる。

T_f, T_m, T_s : 時定数。添字 f, m, s は, それぞれ増大の速い (fast), 中程度 (medium), 遅い (slow) 成分を表すものである。

また, Maslen⁷⁾ は, 騒音暴露前後の聴力域値の音圧の差が, 1 次遅れ系の指数関数で増加すると仮定し, 次式を導出している。

$$\text{TTS}(t) = 20 \log_{10} \{1 + (10^{K/20} - 1) (1 - \exp(-t/T))\} \quad (4.1.4)$$

ただし, K, T は, 式 (1.2) と同様である。

以上の関数形などを参考にして, 以降の検討を進めることにする。

4.2 暴露時間と TTS の増大に関する検討

4.2.1 検討の対象とした実験データ

第3章の24時間白色騒音暴露実験で得られた10名の被験者のTTSの平均値について、種々の関数形を当てはめた。第3章の実験条件は、Table 4.1に掲げる通りである。暴露終了後 t_{\min} の時点におけるTTSを、 TTS_t と記す慣例に従えば、テスト周波数2, 3, 4, 6, 8 kHzのTTSは、おのこの TTS_1 , $TTS_{1.5}$, TTS_2 , TTS_3 , $TTS_{2.5}$, TTS_3 を測定したことになる。なお、テスト周波数2 kHzについては、実験で得られたTTSの値が小さいため、検討の対象から除外した。

Table 4.1 Experimental conditions used in 24 h noise exposure in Chapter 3.

Subject	10 male students
Sound field	Diffuse-field (in a reverberant room)
Exposure noise	White noise
Duration of exposure	24 h
Exposure level	65, 70, 75, 80, 83 and 86 dB SPL (27, 32, 37, 42, 45 and 48 dB in spectrum level)
Test frequency	2, 3, 4, 6 and 8 kHz
Time of audiometry	
after on-set of exposure	0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 20, 22 and 24 h

4.2.2 検討した関数形

検討した関数形は、Table 4.2に示す通りである。式(4.2.1)は、1次遅れ系の指数関数、式(4.2.2)は双曲線関数、式(4.2.3)は、式(4.1.4)と同一であり、Maslen⁷⁾の提案した式であり、騒音暴露前後の域値の音圧差が、1次遅れ系の指数関数で増加するものをdB表示したものである。式(4.2.4)は、従来の式と同じく対数式、式(4.2.5)は、logistic曲線を表し、式(4.2.6)は、原点を通過するように修正したlogistic曲線を表している。このうち、ATSが存在するのは、式(4.2.1), (4.2.2), (4.2.3), (4.2.5), (4.2.6)である。

暴露時間 $t=0$ の時点において, $TTS = 0$ となる, つまり, 原点を通過するのは, 式 (4.2.1), (4.2.2), (4.2.3), (4.2.6) である。

Table 4.2 Forms of functions of TTS growth investigated in this chapter.

$$F(t) = K \{1 - \exp(-t/T)\} \quad (4.2.1)$$

$$F(t) = K \tanh(t/T) \quad (4.2.2)$$

$$F(t) = 20 \log_{10} [1 + (10^{K/20} - 1) \{1 - \exp(-t/T)\}] \quad (4.2.3)$$

$$F(t) = a \log_{10} t + b \quad (4.2.4)$$

$$F(t) = a \log_{10} (t+1) + b \quad (4.2.4')$$

$$F(t) = K / \{1 + m \exp(-t/T)\} \quad (4.2.5)$$

$$F(t) = K \{1 - \exp(-t/T_1)\} / \{1 + m \exp(-t/T_2)\} \quad (4.2.6)$$

t : Duration of exposure

K : Asymptotic threshold shift (constant)

T, T_1, T_2 : Time constants

a, b, m : Constants

4.2.3 結果及び考察

各テスト周波数について, 暴露レベルごとに, 最小二乗法によって, Table 4.2 の関数形を当てはめた場合の残差平方和 ($n=15$) を, Table 4.3 に示す。表中, 最右列の数値は, 各暴露レベルの残差平方和を, 一つの関数形について合計したものである。この数値の大小で比較すると, 式 (4.2.6) の場合に最小となり, 式 (4.2.3), (4.2.4), (4.2.5) の場合, テスト周波数によって順位は異なるが, 同程度の大きさとなる。次いで, 式 (4.2.1), (4.2.2) の順に大きな値をとっている。テスト周波数 4 kHz, 暴露レベル 86 dB SPL (スペクトルレベル $S=48$ dB) の場合について, 最小二乗法で得られた各関数形の最適曲線を, 実験データとともに図示したものが, Fig. 4.1, Fig. 4.2 である。図より, 式 (4.2.3), (4.2.6) が, 実験データに良く追従する曲線であることが分かる。これは, Table 4.3 の結果とも一致している。

Table 4.3 Comparison of the sum of square residuals* between the functions presented in Table 4.2 (The value TTS=0 at $t=0$ not used for calculation).

Test freq.	$F(t)$	Exposure level (dB SPL)						Total**
		65	70	75	80	83	86	
3 kHz	Eq. (4.2.1)	11.24	16.56	14.13	12.16	8.40	13.38	75.87
	Eq. (4.2.2)	10.86	17.36	16.61	15.98	13.16	19.00	92.97
	Eq. (4.2.3)	11.47	15.63	13.37	9.07	5.85	8.22	63.61
	Eq. (4.2.4)	13.64	10.71	13.88	5.03	5.38	10.24	58.88
	Eq. (4.2.5)	10.58	11.07	15.65	10.68	12.46	21.45	81.89
	Eq. (4.2.6)	10.62	8.66	12.11	3.94	5.04	10.49	50.86
4 kHz	Eq. (4.2.1)	12.26	5.63	3.96	7.37	14.00	30.28	73.50
	Eq. (4.2.2)	11.06	5.79	4.59	12.04	23.96	47.00	104.77
	Eq. (4.2.3)	12.60	5.58	4.23	4.98	7.34	11.19	45.92
	Eq. (4.2.4)	14.12	3.96	6.68	4.83	14.37	15.13	59.09
	Eq. (4.2.5)	8.86	3.70	5.46	7.41	8.75	28.12	62.30
	Eq. (4.2.6)	8.85	3.71	3.69	3.38	4.50	9.21	33.34
6 kHz	Eq. (4.2.1)	16.47	26.35	9.42	41.04	67.95	47.37	208.60
	Eq. (4.2.2)	15.94	26.97	11.96	53.55	86.30	70.18	264.90
	Eq. (4.2.3)	16.71	26.30	8.34	30.29	38.34	14.04	134.02
	Eq. (4.2.4)	28.76	27.37	9.12	20.94	18.53	9.65	114.37
	Eq. (4.2.5)	12.13	27.17	6.80	20.41	23.69	14.76	114.45
	Eq. (4.2.6)	12.22	25.77	5.93	14.24	14.76	6.37	79.29
8 kHz	Eq. (4.2.1)	12.67	16.88	11.75	8.82	38.43	22.69	111.24
	Eq. (4.2.2)	12.96	17.39	13.56	12.02	52.48	35.54	143.95
	Eq. (4.2.3)	12.61	16.72	11.16	7.09	26.10	8.22	81.90
	Eq. (4.2.4)	12.84	16.23	10.15	16.72	17.46	4.72	78.12
	Eq. (4.2.5)	10.14	10.18	11.28	7.32	16.77	10.54	66.23
	Eq. (4.2.6)	9.99	10.28	8.97	3.78	10.54	3.78	47.34

* The number of data for each entry is 15.

** Sum of the value for each exposure level.

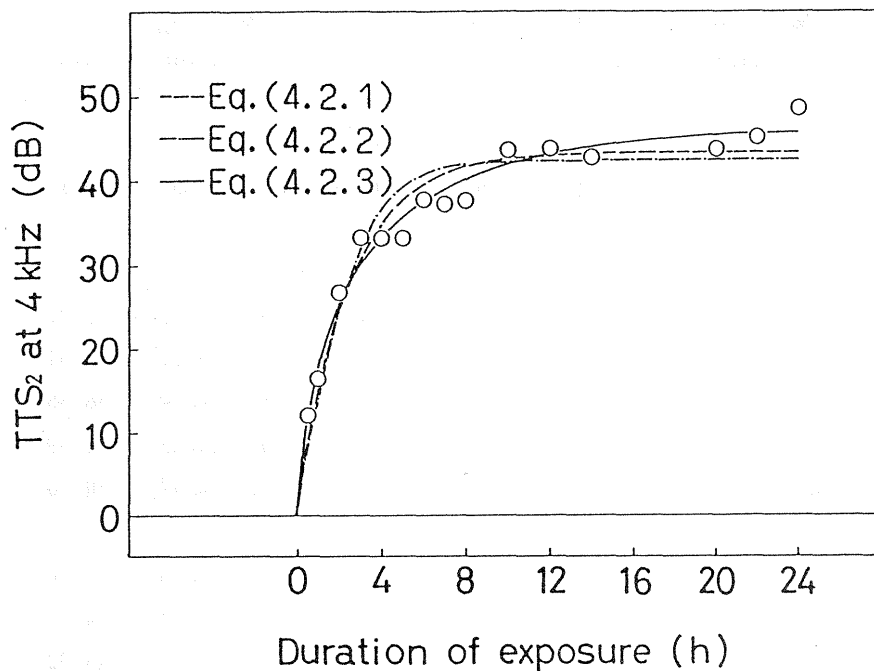


Fig. 4.1 Growth of TTS₂ at 4 kHz. Exposure noise is 86 dB SPL white noise. Broken, chain and solid curves show calculations from Eq. (4.2.1), Eq. (4.2.2) and Eq. (4.2.3) respectively.

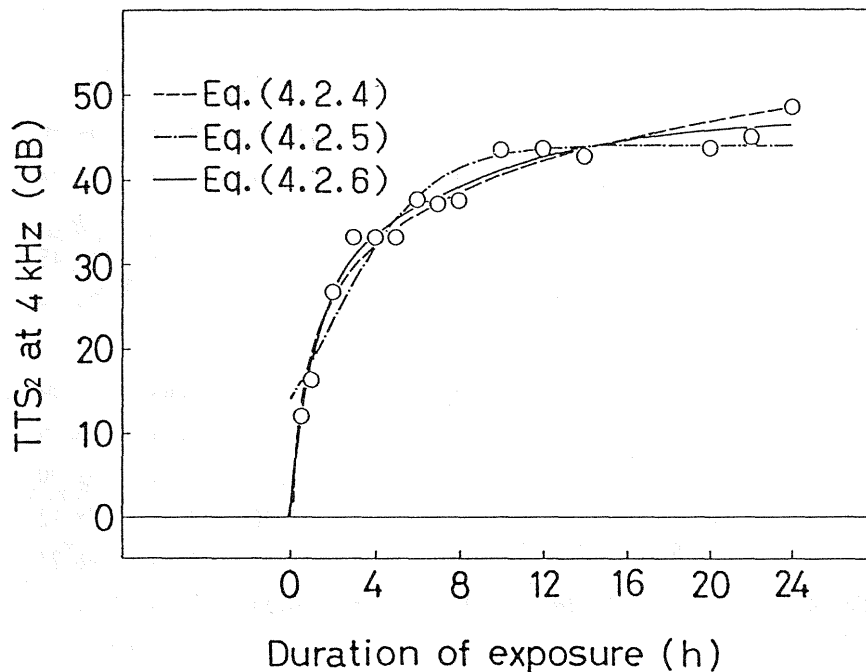


Fig. 4.2 Growth of TTS₂ at 4 kHz. Exposure noise is 86 dB SPL white noise. Broken, chain and solid curves show calculations from Eq. (4.2.4), Eq. (4.2.5) and Eq. (4.2.6) respectively.

ここで、式(4.2.4)、(4.2.5)は、原点を通過しない関数形である。定義上、暴露時間 $t=0$ の時点では、必ず TTS は 0 とならなければならないので、原点 ($t=0$, TTS = 0) を含まないデータ群に良く追従していたとしても、これらの式は、TTS の予測式としては、合理性に欠けると考えられる。そこで、各暴露レベルについて、原点 ($t=0$, TTS = 0) を一組のデータとして含めた上で、同様に関数形を当てはめた結果を Table 4.4 に示す。表中の数値は、Table 4.3 と同じく、残差平方和 ($n=16$) である。なお、式(4.2.4)の場合、 $\log_{10} t$ が、 $t=0$ において、負の無限大となることを避けるため、Table 4.2 の式(4.2.4')のように修正したものについて当てはめた。式(4.2.1)、(4.2.2)、(4.2.3)、(4.2.6)の場合は、原点を通過する関数形であるため、残差平方和の値は、Table 4.3 と同一になるので省略した。表より分かるように、式(4.2.4')、(4.2.5)ともに、残差平方和の値は、Table 4.3 に比べて大きくなる。

Table 4.4 Comparison of the sum of square residuals* between the functions presented in Table 4.2 (The value TTS=0 at $t=0$ used for calculation).

Test freq.	F(t)	Exposure level (dB SPL)						Total**
		65	70	75	80	83	86	
3 kHz	Eq. (4.2.4')	18.00	12.23	24.78	11.04	29.21	54.54	149.80
	Eq. (4.2.5)	10.95	15.77	18.84	19.12	18.49	28.52	111.69
4 kHz	Eq. (4.2.4')	20.04	4.05	27.22	22.99	30.39	42.14	146.83
	Eq. (4.2.5)	8.87	6.29	7.26	13.90	25.54	59.13	120.99
6 kHz	Eq. (4.2.4')	31.53	23.46	37.45	28.79	28.40	56.10	205.73
	Eq. (4.2.5)	12.59	28.13	10.73	38.43	72.18	74.13	236.19
8 kHz	Eq. (4.2.4')	14.84	16.74	19.98	45.40	37.46	29.52	163.94
	Eq. (4.2.5)	10.87	11.88	13.50	11.55	36.07	41.56	125.43

* The number of data for each entry is 16.

** Sum of the value for each exposure level.

また、第3章でも述べたように、TTS に漸近値 (ATS) が存在することは、多くの研究者の一致した見解であり、我々の得た実験データもそれを裏付けていた。従って、ATS が存在しない形の式 (4.2.4) の対数式よりも、ATS (式中 K で表されている) が存在する関数形を充てる方が好ましい。従って、以降のモデルの検討には、式 (4.2.1), (4.2.3), (4.2.6) を採用する。

ここで、 K の値は、暴露レベル S によって、当然、変化するものと考えられるが、時定数なども、 S によって変化するか否かを検討しておく必要がある。Table 4.5 は、いずれのテスト周波数においても、残差平方和が最小となった式 (4.2.6) の各定数の値を、各暴露レベルごとに示したものである。 K の値については、暴露レベルの上昇とともに増加する傾向があるが、その他 T_1 , m , T_2 は、暴露レベルによって、系統的な変化を示していない。そこで、各暴露レベルの TTS の増大を、それぞれの K (ATS) の値で除算して得られる規準化された増大曲線は、暴露レベルによらず、同一であるとみなせるものと仮定した。すなわち、暴露レベル S 、暴露時間 t における TTS (S, t) は、一般に次式で表されるものとする。

$$\text{TTS} (S, t) = F \{K(S), t\} \quad (4.2.7)$$

さらに、式 (4.2.1), (4.2.6) の場合には、より単純な、関数の積で表され、

$$\text{TTS} (S, t) = K(S) F(t) \quad (4.2.8)$$

となる。

Table 4.5 Constants for Eq. (4.2.6).

Test freq.	Exposure level	Constants			
		K	T_1	m	T_2
3 kHz	65 dB SPL	4.4	46.4	4.54	152.1
	70 dB SPL	46.8	46.5	13.10	2060.2
	75 dB SPL	8.4	50.0	1.77	225.8
	80 dB SPL	10.9	57.8	0.83	514.0
	83 dB SPL	12.6	76.5	1.20	332.0
	86 dB SPL	14.7	74.5	1.57	282.7
4 kHz	65 dB SPL	3.6	31.3	26.32	99.1
	70 dB SPL	3.3	0.7	0.76	383.6
	75 dB SPL	8.8	76.4	2.58	228.2
	80 dB SPL	11.6	51.2	1.65	260.5
	83 dB SPL	16.6	31.4	1.59	175.6
	86 dB SPL	23.5	61.9	0.71	383.0
6 kHz	65 dB SPL	6.2	0.04	8.16	212.6
	70 dB SPL	5.0	42.0	2.18	176.0
	75 dB SPL	9.6	30.2	2.59	225.0
	80 dB SPL	15.9	40.1	1.58	526.7
	83 dB SPL	20.7	33.6	1.02	442.6
	86 dB SPL	24.1	42.7	0.86	346.6
8 kHz	65 dB SPL	4.2	18.9	3.09	312.1
	70 dB SPL	4.8	3.1	2.68	359.1
	75 dB SPL	7.2	42.7	2.25	264.2
	80 dB SPL	14.3	83.8	3.26	584.7
	83 dB SPL	16.1	36.5	1.60	424.7
	86 dB SPL	20.2	67.2	0.80	519.7

4.3. 暴露レベルと TTS の増大に関する検討

4.3.1 検討の対象とした実験データ

4.2.1 において採用した 24 時間白色騒音暴露実験データに加えて、高木²⁾の 8 時間白色騒音暴露実験データも併せて検討を行った。高木の実験の条件を Table 4.6 に示す。両実験データの相違点としては、被験者の人数、及び暴露の音場が拡散音場と自由音場とで異なっていることが挙げられる。音場差が TTS に及ぼす影響については、第 2 章で既に検討した。その結果は、両音場ともに、自由音場用マイクロホンを用いて、同一の暴露レベルに設定した場合、3, 4 kHz では、得られる TTS の値に有意な差は認められず、6, 8 kHz では、自由音場における TTS が、拡散音場におけるそれを上回ったものの、その差は、暴露レベルに換算して、高々 3 dB であり、ほぼ同程度の暴露量とみなし得るものであった。むしろ、被験者が、人数も含めて異なっている点の方が、得られる結果に与える影響が大きくなると考えられる。従って、今回は、両実験データをそのまま修正せず採用することにした。

関数形の検討の対象としたのは、両実験で共通の暴露時間である 1, 2, 4, 6, 8 時間のデータである。なお、今回も同様に、テスト周波数 2 kHz については、TTS の値が小さいため、対象から除外した。

Table 4.6 Experimental conditions used in 8 h noise exposure²⁾.

Subjects	5 male students
Sound field	Free-field (in an anechoic room)
Exposure noise	White noise
Duration of exposure	8 h
Exposure level	85, 90, 93 and 95 dB SPL (47, 52, 55 and 57 dB in spectrum level)
Test frequency	2, 3, 4, 6 and 8 kHz
Time of audiometry after on-set of exposure	0.25, 0.5, 1, 2, 4, 6 and 8 h

4.3.2 検討した関数形

検討した関数形は、Table 4.7 に示す通りである。式(4.3.1), (4.3.2), (4.3.3), (4.3.4)は、それぞれ、暴露レベル S の1次, 2次, 3次, 4次関数であり、式(4.3.5)は、Mills⁵⁾, Maslen⁷⁾などの提案した式である。式(4.3.6)は、指数関数、つまり縦軸、横軸ともに対数軸とした場合に直線関係があるものである。

Table 4.7 Forms of functions of the level dependence of TTS
investigated in this paper.

$K(S) = a(S - b)$	(4.3.1)
$K(S) = a(S - b)^2$	(4.3.2)
$K(S) = a(S - b)^3$	(4.3.3)
$K(S) = a(S - b)^4$	(4.3.4)
$K(S) = a \log_{10} \{1 + 10^{(S - b)/10}\}$	(4.3.5)
$K(S) = a \exp(bS)$	(4.3.6)

S : Spectrum level of exposure noise

a, b : Constants

4.3.3 結果及び考察

各テスト周波数について、暴露時間ごとに、最小二乗法によって、Table 4.7 の関数形を当てはめた場合の残差平方和($n = 10$)を、Table 4.8 に示す。表中、最右列の数値は、各暴露時間の残差平方和を、一つの関数形について合計したものである。この数値の大小で比較すると、式(4.3.6)の場合に最小となり、式(4.3.1)~(4.3.4)は、高次になるほど小さくなる。これは次数を上げていくと、式(4.3.6)の指数式による結果に収束していくものと推定される。式(4.3.5)の場合は、式(4.3.2)の2次式と同程度である。Fig. 4.3は、テスト周波数4 kHz, 暴露時間8時間の場合について、最小二乗法で得られた式(4.3.4), (4.3.5), (4.3.6)の最適曲線を実験データとともに図示したものである。図中白丸は、24時間騒音暴露実験³⁾のデータを、黒丸は、8時間騒音暴露実験²⁾のデータを表している。

Table 4.8 Comparison of the sum of square residuals* between the functions presented in Table 4.7.

Test freq.	$K(S)$	Exposure time					Total**
		1 h	2 h	4 h	6 h	8 h	
3 kHz	Eq. (4.3.1)	146.49	136.05	284.47	349.98	318.05	1235.04
	Eq. (4.3.2)	84.01	79.07	112.32	134.11	105.29	514.80
	Eq. (4.3.3)	77.43	69.09	100.71	118.67	86.33	452.23
	Eq. (4.3.4)	74.92	65.13	92.51	109.20	76.71	418.47
	Eq. (4.3.5)	81.16	80.46	112.85	134.00	103.05	511.52
	Eq. (4.3.6)	69.14	56.88	73.14	87.66	56.28	343.10
4 kHz	Eq. (4.3.1)	276.45	239.59	324.95	389.48	491.64	1722.11
	Eq. (4.3.2)	32.16	12.17	41.83	54.43	111.65	252.24
	Eq. (4.3.3)	12.73	6.36	30.58	47.19	91.37	188.23
	Eq. (4.3.4)	10.94	4.43	26.03	43.37	83.07	167.84
	Eq. (4.3.5)	13.12	8.98	34.32	52.84	105.18	214.44
	Eq. (4.3.6)	10.62	5.45	24.22	44.74	74.01	159.04
6 kHz	Eq. (4.3.1)	163.75	176.81	246.32	292.12	304.16	1183.16
	Eq. (4.3.2)	36.17	22.32	36.51	47.75	95.72	238.47
	Eq. (4.3.3)	27.46	16.29	22.86	29.90	70.04	166.55
	Eq. (4.3.4)	24.57	13.57	18.23	21.97	59.97	138.31
	Eq. (4.3.5)	33.62	23.94	34.99	49.91	100.79	243.25
	Eq. (4.3.6)	21.06	11.47	14.48	8.49	41.53	97.03
8 kHz	Eq. (4.3.1)	191.87	293.17	364.04	320.46	261.00	1430.54
	Eq. (4.3.2)	28.56	107.95	84.92	58.54	60.32	340.29
	Eq. (4.3.3)	27.39	98.82	66.96	45.82	50.12	289.11
	Eq. (4.3.4)	24.60	91.13	59.42	39.99	43.29	258.43
	Eq. (4.3.5)	27.61	101.17	70.41	54.27	64.36	317.82
	Eq. (4.3.6)	17.10	68.74	40.70	28.67	28.79	184.00

* The number of data for each entry is 10.

** Sum of the value for each exposure time.

Table 4.8 と同様に、実験データに最も良く追隨しているのは、式(4.3.6)であり、次いで、式(4.3.4)、(4.3.5)であることが、図より分かる。

Fig. 4.3 は、暴露レベルを量、TTS を効果とする、量—効果関係 (dose-effect relationship)を表している。図より分かるように、低レベル及び中レベルの範囲では、この関係はS字状を呈している。従来のTTSの増大の式では、この関係に、直線関係を充てているために、式を外挿しなければならないような低レベル暴露の場合には、TTSの推定値が過小評価されて、危険側に偏るものと思われる。また、式(4.3.1)の残差平方和も大きく、データに良く追隨していない。そのため、今回の式(4.3.4)、(4.3.5)、(4.3.6)のような

曲線関係を充てると、実験データに良く追隨するばかりでなく、TTSの推定値をより安全側のそれに修正することが可能となる。ただ、これらの曲線群では、高レベル側では、逆に、TTSの推定値が過大評価されることが予測される。しかし、むしろ、安全側に評価されているものと考えて、高レベル側にまで、S字状曲線を適用して式を複雑にするこ

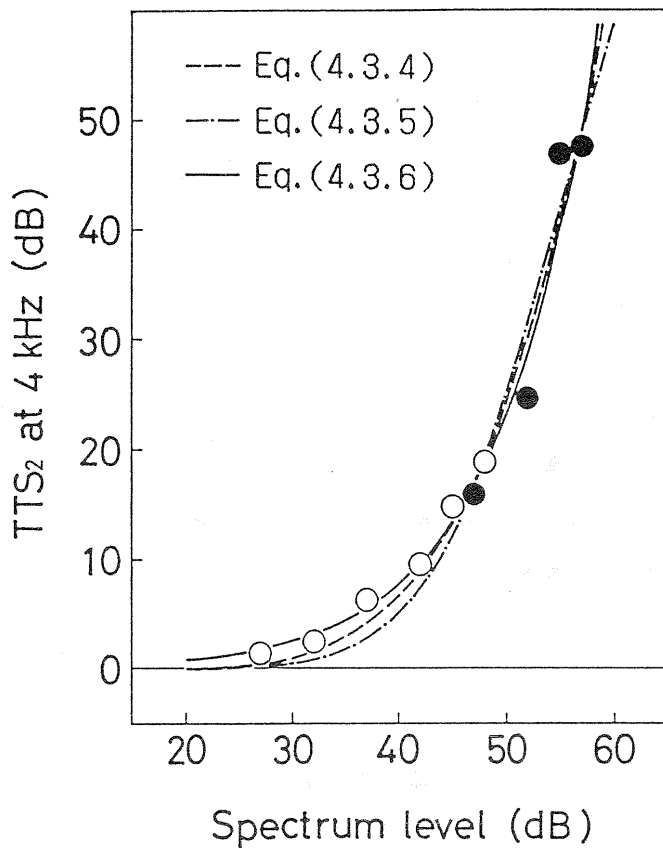


Fig. 4.3 The relation between TTS₂ at 4 kHz after 8 h exposure to noise and spectrum level of noise. Solid circles indicate the data reported by Takagi²⁾, and open circles indicate those from Chapter 3. Broken, chain and solid curves show calculations from Eq. (4.3.4), Eq. (4.3.5) and Eq. (4.3.6) respectively.

とは避け、上記の曲線群を採用することとした。

なお、前述したように式(4.3.1)～(4.3.4)の1～4次式については、高次になるにつれて、式(4.3.6)の指数関数に収束するものと考えられるため、対象から除外する。従って、以降の検討では、式(4.3.5)、(4.3.6)を取り上げることにする。

4.4. TTS の増大の式

4.4.1 検討の対象とした実験データ

第3章の24時間騒音暴露実験のデータ、高木²⁾の8時間騒音暴露実験のデータに加えて、第2章2.2の音場差を検討した暴露実験のデータも併せて、検討した。第2章2.2の実験では、第3章の実験と同一の被験者に対して、同一騒音を、それぞれ残響室内、無響室内で暴露した。ただし、暴露レベルは、80, 83, 86, 89 dB SPL(スペクトルレベル $S=42, 45, 48, 51$ dB)の4条件、域値の測定は、10, 20, 40, 60 minの4時点である。前述したように、両音場で得られたTTSは、同程度とみなし得るので、両者の平均値を検討データとした。なお、テスト周波数2 kHzの場合、TTSの値が小さなものがほとんどであるので、暴露時間は短い、TTSの値は大きな高木²⁾のデータ(暴露音: 1000～2000 Hzのオクターブバンド騒音, $S=65$ dB, $t=5\sim155$ min)も検討の対象とした。以上により、テスト周波数ごとのデータ数は、2 kHzでは、129、3, 4, 6, 8 kHzでは、134となった。

4.4.2 検討した関数形

従来のTTSの増大の式は、 TTS_2 (暴露後休止2 min時点のTTS)を与えるものであった¹⁾。しかし、単位階段関数法⁸⁾を適用して、変動騒音暴露によるTTSを、予測するために、変動パターンを1 minより小さな時間刻みに分割した場合、最終の時間刻みのTTSの算出の際に、 $\log_{10} t$ が負になることを避けるためには、 TTS_4 のように2 minより長い休止後のTTSを計算して、さらにそれを TTS_2 に換算する⁹⁾という手順をとらねばならない¹⁰⁾ことがあった。従って、このような煩わしさを避けるため、今回は、暴露後任意の休止時間におけるTTSを与える式を求めることにした。そのためには、まず、暴露レベル S dB、暴露時間 t minの騒音暴露直後の TTS_0 が、式(4.2.7)より、次式で与えられるものとする。

$$TTS_0(S, t) = F(K(S), t) \quad (4.4.1)$$

ここで、単位階段関数法⁸⁾を適用すると、暴露後休止 τ_{\min} の TTS_τ は、

$$\begin{aligned} TTS_\tau(S, t) &= TTS_0(S, t + \tau) - TTS_0(S, \tau) \\ &= F\{K(S), t + \tau\} - F\{K(S), \tau\} \end{aligned} \quad (4.4.2)$$

と与えられる。第2章及び第3章の実験データの場合は、テスト周波数2, 3, 4, 6, 8 kHzについて、 τ の値はそれぞれ、1, 1.5, 2, 2.5, 3であり、高木の実験データの場合は、 τ の値はすべて2である。式(4.2)に、これらの実験データを当てはめ、 S , t , τ の3変数を独立変数とする重回帰式の回帰係数を決定すれば、上記の目的は達せられる。すなわちこれは、 TTS_0 を与える式(4.4.1)を決定することに外ならない。従来の式では、 $\tau < 2$ の場合の TTS を算出することは不可能であったが、式(4.4.1), (4.4.2)の場合には、それも可能となる。実際の暴露実験では $\tau = 0$ の場合の TTS を測定することはできないが、式の上での TTS_0 は、汎用性の高いものと言うことができる。従って、本研究では、 TTS_0 を与える式を求めることとする。

$F(t)$ としては、4.2の結果を踏まえ、Table 4.2より、式(4.2.1), (4.2.3), (4.2.6)の3式を検討の対象とした。 $K(S)$ としては、4.3の結果を踏まえて、Table 4.7より、式(4.3.5), (4.3.6)の2式を検討の対象とした。従って、6種類の組合せの式についての検討となる。

4.4.3 結果及び考察

各テスト周波数についての、最小二乗法による関数形の当てはめた結果を、残差平方和及び赤池の情報量基準¹¹⁾(Akaike information criterion; 以降AICと略記する)でTable 4.9に示す。AICは、重回帰モデルについては、次式のように表され、その値が小さいほど、より適合したモデルと判定される。

$$AIC = n(\log_e 2\pi + 1) + n \log_e (Se/n) + 2k \quad (4.4.3)$$

ただし、 n : データの個数

Se : 残差平方和

k : モデルの自由パラメータ数。今回の場合、係数の個数+2となる。

Table 4.9 Comparison of the sum of square residuals between the functions presented in Table 4.2 and Table 4.7.

Test freq.	$F(t)$	n	$K(S)$					
			Eq. (4.3.5)			Eq. (4.3.6)		
			Se	k	AIC	Se	k	AIC
2 kHz	Eq. (4.2.1)	129	882.53	5	624.15	573.43	5	568.53
	Eq. (4.2.3)	129	693.59	5	593.07	384.57	5	517.00
	Eq. (4.2.6)	129	760.34	7	608.93	460.54	7	544.25
3 kHz	Eq. (4.2.1)	134	1441.98	5	708.65	850.13	5	637.85
	Eq. (4.2.3)	134	1374.65	5	702.24	787.24	5	627.55
	Eq. (4.2.6)	134	1408.19	7	709.47	804.88	7	634.52
4 kHz	Eq. (4.2.1)	134	1150.73	5	678.42	871.67	5	641.20
	Eq. (4.2.3)	134	936.72	5	650.84	493.63	5	565.00
	Eq. (4.2.6)	134	875.08	7	645.72	543.55	7	581.91
6 kHz	Eq. (4.2.1)	134	1555.73	5	718.82	1158.01	5	679.26
	Eq. (4.2.3)	134	1239.87	5	688.42	731.20	5	617.65
	Eq. (4.2.6)	134	992.23	7	662.56	478.83	7	564.92
8 kHz	Eq. (4.2.1)	134	1333.15	5	698.14	1007.01	5	660.54
	Eq. (4.2.3)	134	1035.95	5	664.34	702.72	5	612.33
	Eq. (4.2.6)	134	864.27	7	644.06	492.48	5	568.69

n : Number of data

Se : Sum of square residuals

k : Number of free parameters of model

AIC: Akaike information criteria

今回のように、非線形モデルを対象とし、かつ自由パラメータ数も異なる場合には、有用な情報量と言える。

表より分かるように、AIC が最小となるのは、テスト周波数 2, 3, 4 kHz については、式(4.2.3)と式(4.3.6)を組み合わせた場合、テスト周波数 6, 8 kHz については、式(4.2.6)と式(4.3.6)を組み合わせた場合であった。

さらに、テスト周波数 4 kHz の実測値とモデルによる予測値を図示したものが、Fig. 4.4, Fig. 4.5 である。実測値、予測値ともに、TTS₂ の値を、暴露レベル $S=27, 37, 45, 48, 55$ dB について Fig. 4.4 に、 $S=32, 42, 47, 52, 57$ dB について Fig. 4.5 に、それぞれ図示した。破線が、式(4.2.3)と(4.3.6)を組み合わせたモデル、つまり次式と式(4.4.2)による予測値を表している。

$$\begin{aligned} \text{TTS}_0(S, t) &= 20 \log_{10} \{1 + (10^{K(S)/20} - 1)(1 - \exp(-t/T))\} \\ K(S) &= a \exp(bS) \end{aligned} \quad (4.4.4)$$

実線が、式(4.2.6)と(4.3.6)を組み合わせたモデル、つまり次式と式(4.4.2)による予測値を示している。

$$\text{TTS}_0(S, t) = a \exp(bS) \frac{1 - \exp(-t/T_1)}{1 + m \exp(-t/T_2)} \quad (4.4.5)$$

ただし、(4.4.4), (4.4.5)式ともに、

S : 暴露音のスペクトルレベル (dB)

t : 暴露時間 (min)

a, b, T, T_1, m, T_2 : 定数

である。式(4.4.2), (4.4.4)による予測値(破線)は、比較的レベルの低い 24 時間騒音暴露実験のデータ ($S < 52$ dB) には、良く追従しているが、高レベルの 8 時間騒音暴露実験のデータ ($S \geq 52$ dB) の場合には、適合度が良くない。そこで、Table 4.9 の式(4.4.2), (4.4.4)と式(4.4.2), (4.4.5)の残差平方和を、 $S < 52$ dB の場合と、 $S \geq 52$ dB の場合に分割して表示したものが Table 4.10 である。テスト周波数 2 kHz を除いて、高レベルの場合には、式(4.4.2), (4.4.5)の方が、残差平方和及び AIC は小さく、実測値によく追従している。総合的に判定すれば、式(4.4.2), (4.4.5)の方が、暴露レベルの広い範囲にわたって、実験データに追従する汎用性の高いモデルとすることができる。

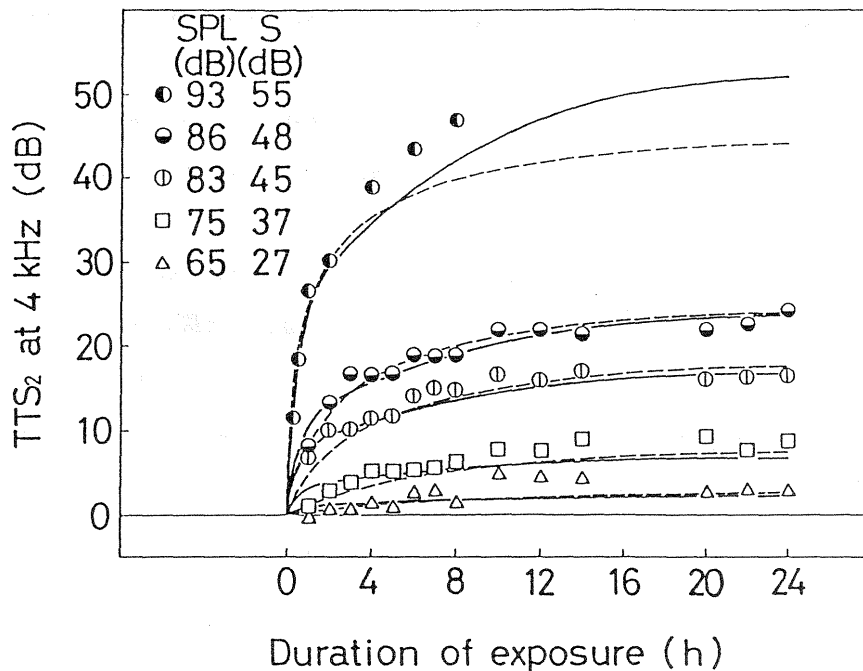


Fig. 4.4 Growth of TTS₂ at 4 kHz. Broken curves show calculations from Eq. (4.4.2) and Eq. (4.4.4), and solid curves show those from Eq. (4.4.2) and Eq. (4.4.5).

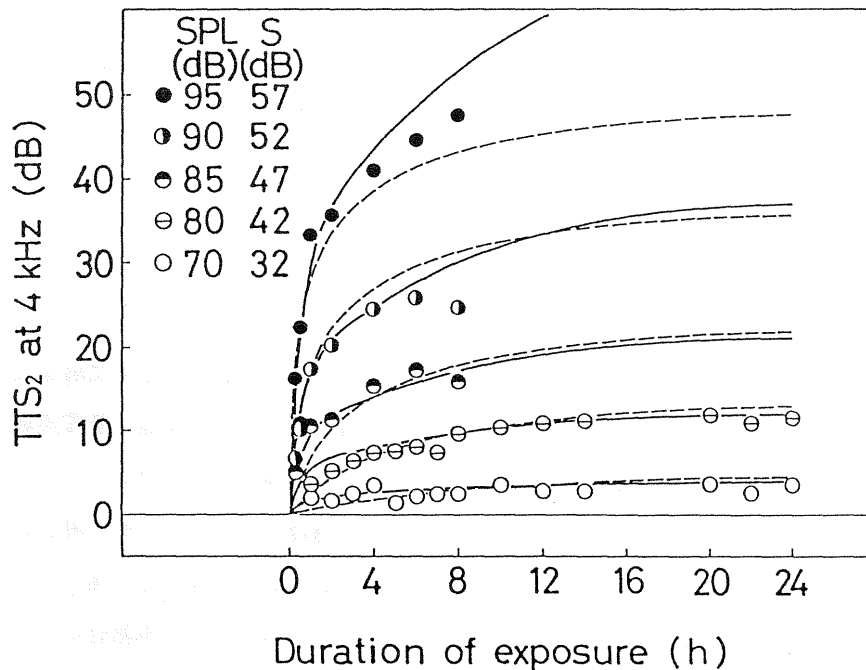


Fig. 4.5 Growth of TTS₂ at 4 kHz. Broken curves show calculations from Eq. (4.4.2) and Eq. (4.4.4), and solid curves show those from Eq. (4.4.2) and Eq. (4.4.5).

Table 4.10 Divided sum of square residuals in Table 4.9.

Test freq.		$S < 52$ dB				$S \geq 52$ dB			
		n	Se	k	AIC	n	Se	k	AIC
2 kHz	Eq. (4.4.4)	106	312.05	5	425.27	14	72.52	5	79.07
	Eq. (4.4.5)	106	379.00	7	449.87	14	81.53	7	84.72
3 kHz	Eq. (4.4.4)	113	495.34	5	497.68	21	291.89	5	124.86
	Eq. (4.4.5)	113	575.12	7	518.55	21	229.76	7	123.84
4 kHz	Eq. (4.4.4)	113	242.46	5	416.95	21	251.17	5	121.71
	Eq. (4.4.5)	113	339.99	7	459.15	21	203.56	7	121.30
6 kHz	Eq. (4.4.4)	113	391.67	5	471.14	21	339.53	5	128.04
	Eq. (4.4.5)	113	352.90	7	463.36	21	125.93	7	111.21
8 kHz	Eq. (4.4.4)	113	368.38	5	464.22	21	334.34	5	127.72
	Eq. (4.4.5)	113	263.76	7	430.46	21	228.72	7	123.74

S : Spectrum level of exposure noise

n, Se, k, AIC : Same as Table 4.9.

なお、式(4.4.2), (4.4.5)の場合は、暴露レベル S 、暴露時間 t 、休止時間 τ の重回帰式を求めたものである。テスト周波数 4 kHz について、暴露レベル 86 dB SPL に固定して暴露時間について単回帰式を求めた Fig. 4.2、及び暴露時間を 8 時間に固定して暴露レベルについて単回帰式を求めた Fig. 4.3 の曲線で表される値と、Fig. 4.4 のそれとは、必ずしも一致しない。

Table 4.11 Constants for Eq. (4.4.5).

Test freq.	Constants				
	a	b	T_1	m	T_2
0.5 kHz	0.016	0.102	15.7	2.00	105.0
0.8 kHz	0.037	0.101	62.0	1.77	257.4
1 kHz	0.115	0.090	94.1	1.62	617.3
1.5 kHz	1.347	0.054	44.8	1.47	352.0
2 kHz	0.063	0.102	13.4	1.61	179.9
3 kHz	0.118	0.103	41.8	1.16	182.7
4 kHz	0.106	0.114	31.8	1.04	337.6
6 kHz	0.261	0.098	14.8	1.07	412.0
8 kHz	0.110	0.112	17.0	1.41	458.6

式(4.4.5)の各定数の値を，テスト周波数ごとに，Table 4.11 に示した。表には，テスト周波数 0.5, 0.8, 1, 1.5 kHz における TTS の増大の式の定数も記載されているが，これは，従来の式の基礎となったデータ¹⁾に，式(4.4.2)，(4.4.5)を最小二乗法により，当てはめることによって求めた。4 kHz を除く他のテスト周波数における実験データと式(4.4.2)，(4.4.5)による予測計算値を Fig. 4.6～4.17 に示した。テスト周波数 2, 3, 6, 8 kHz については，高木²⁾と第3章の実験データの τ の値が異なるため，図を別にしている。なお，白色騒音を暴露音とした場合の，TTS₂ の予測計算例を付録に示した (Table A.16～A.22)。

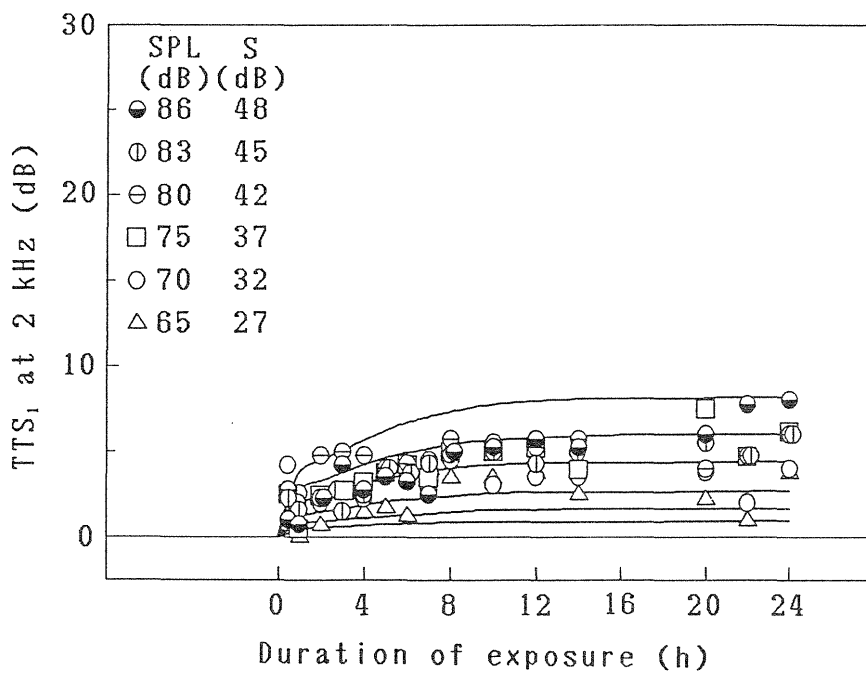


Fig. 4.6 Growth of TTS_1 at 2 kHz. Solid curves show calculations from Eq. (4.4.2) and Eq. (4.4.5).

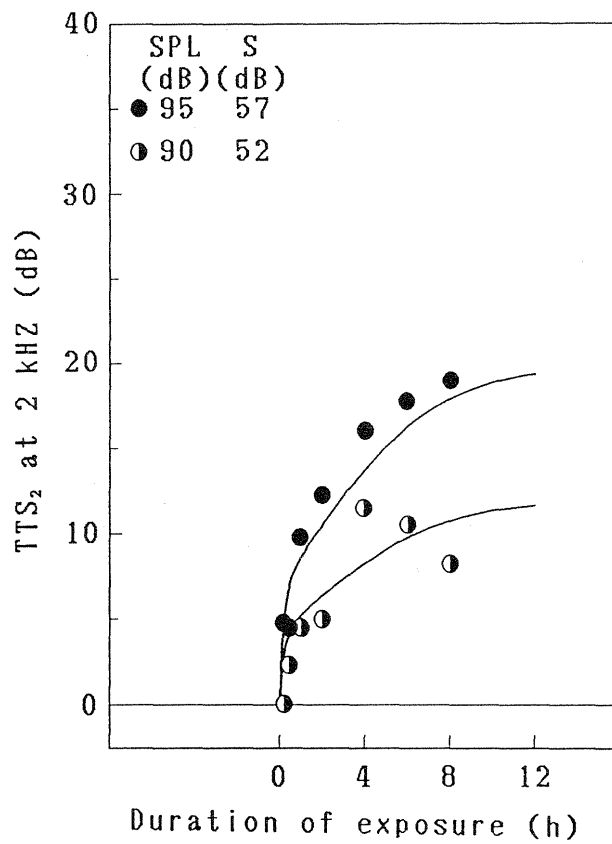


Fig. 4.7 Growth of TTS₂ at 2 kHz. Solid curves show calculations from Eq. (4.4.2) and Eq. (4.4.5).

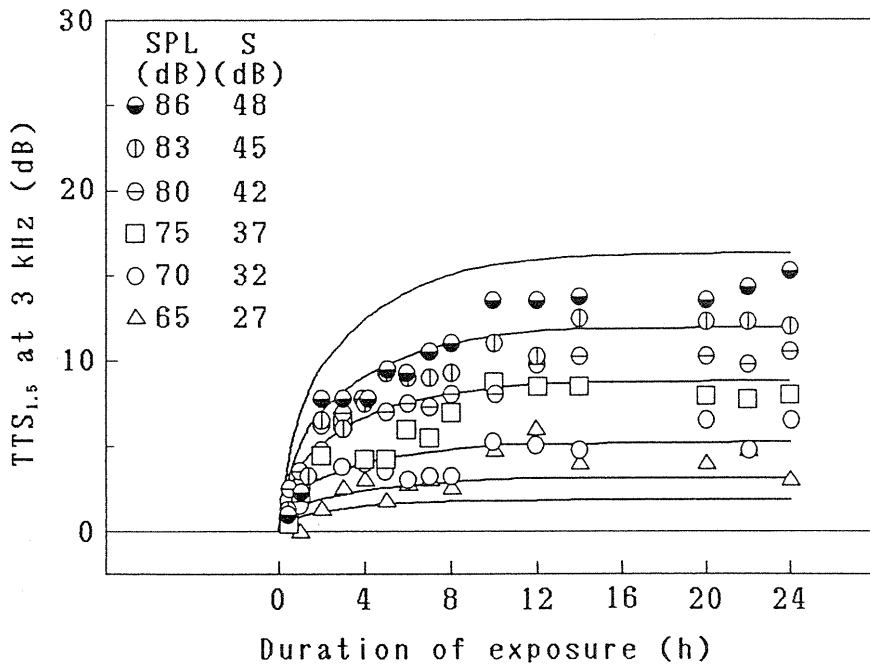


Fig. 4.8 Growth of $TTS_{1.5}$ at 3 kHz. Solid curves show calculations from Eq. (4.4.2) and Eq. (4.4.5).

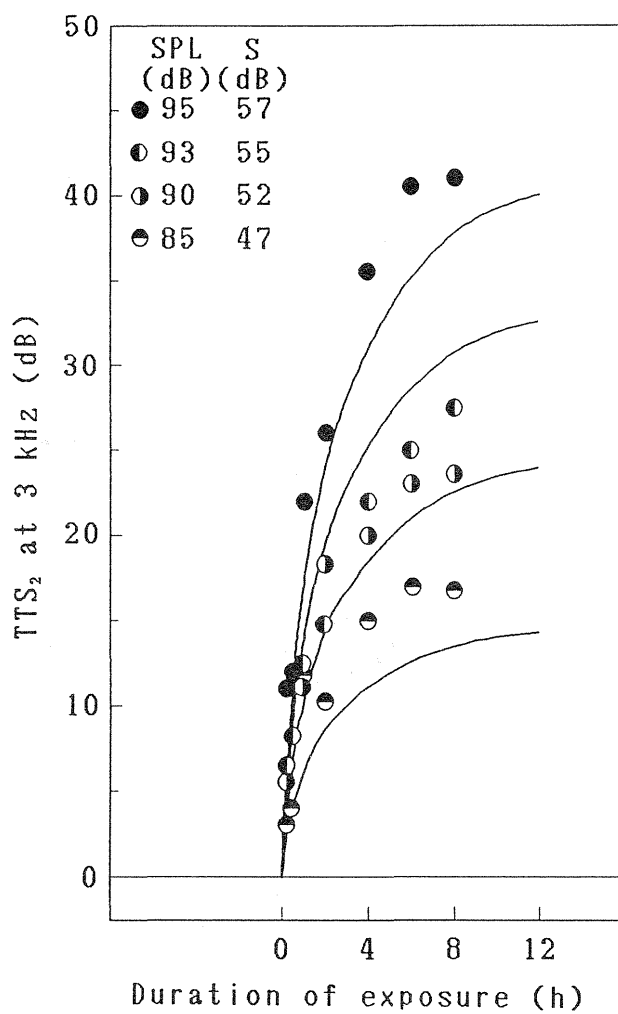


Fig. 4.9 Growth of TTS_2 at 3 kHz. Solid curves show calculations from Eq. (4.4.2) and Eq. (4.4.5).

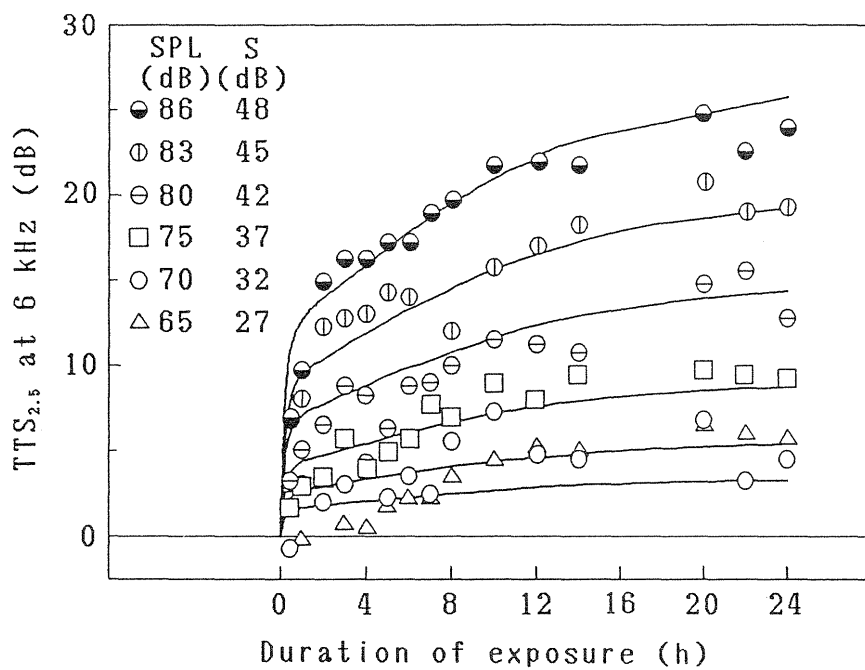


Fig. 4.10 Growth of TTS_{2.5} at 6 kHz. Solid curves show calculations from Eq. (4.4.2) and Eq. (4.4.5).

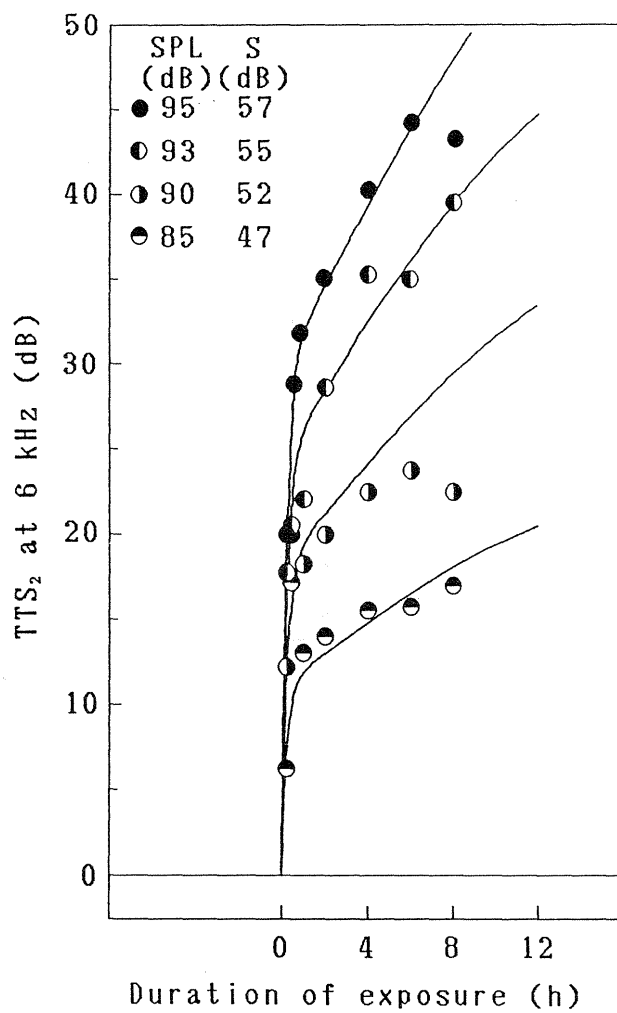


Fig. 4.11 Growth of TTS₂ at 6 kHz. Solid curves show calculations from Eq. (4.4.2) and Eq. (4.4.5).

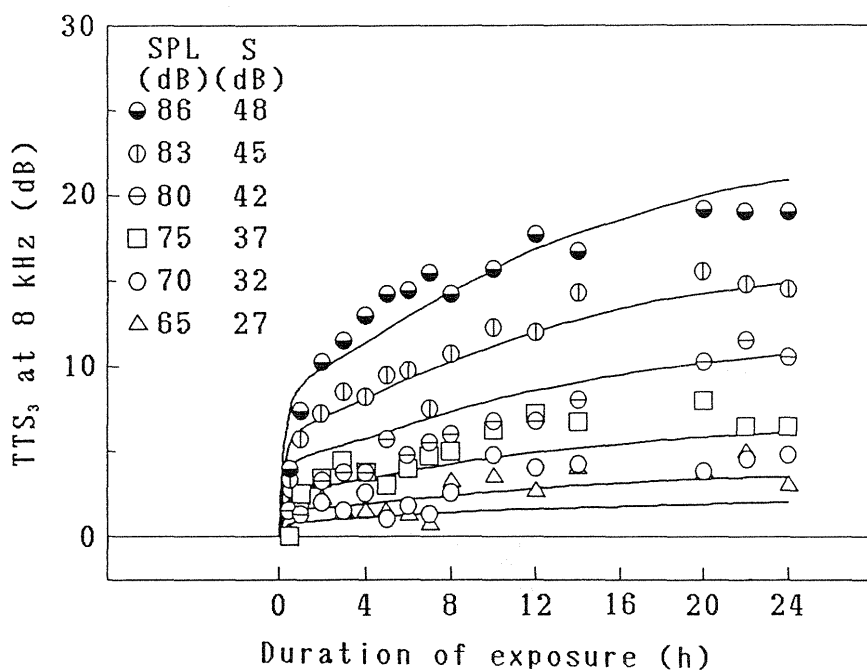


Fig. 4.12 Growth of TTS_3 at 8 kHz. Solid curves show calculations from Eq. (4.4.2) and Eq. (4.4.5).

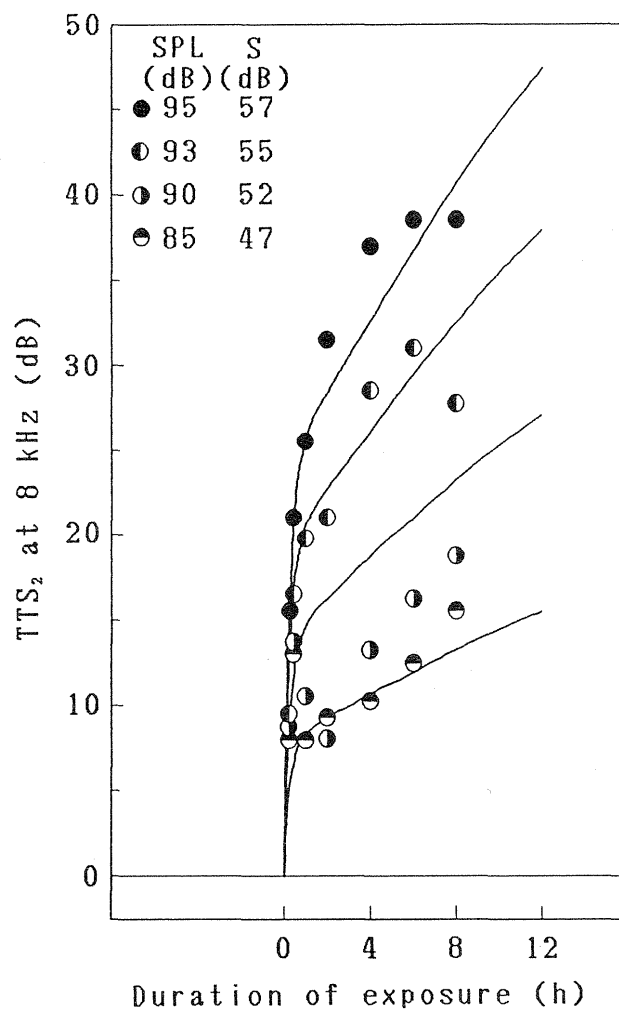


Fig. 4.13 Growth of TTS_2 at 8 kHz. Solid curves show calculations from Eq. (4.4.2) and Eq. (4.4.5).

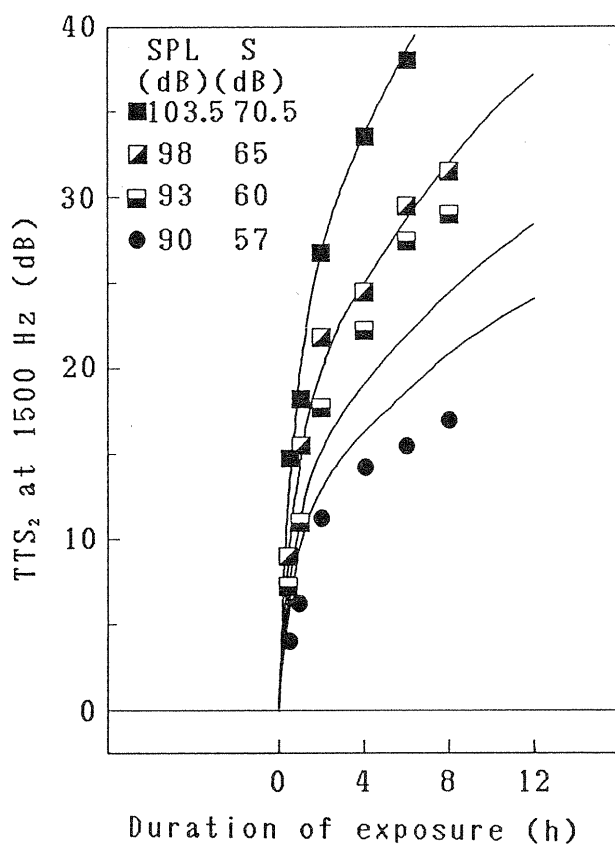


Fig. 4.14 Growth of TTS₂ at 1500 Hz. Solid curves show calculations from Eq. (4.4.2) and Eq. (4.4.5).

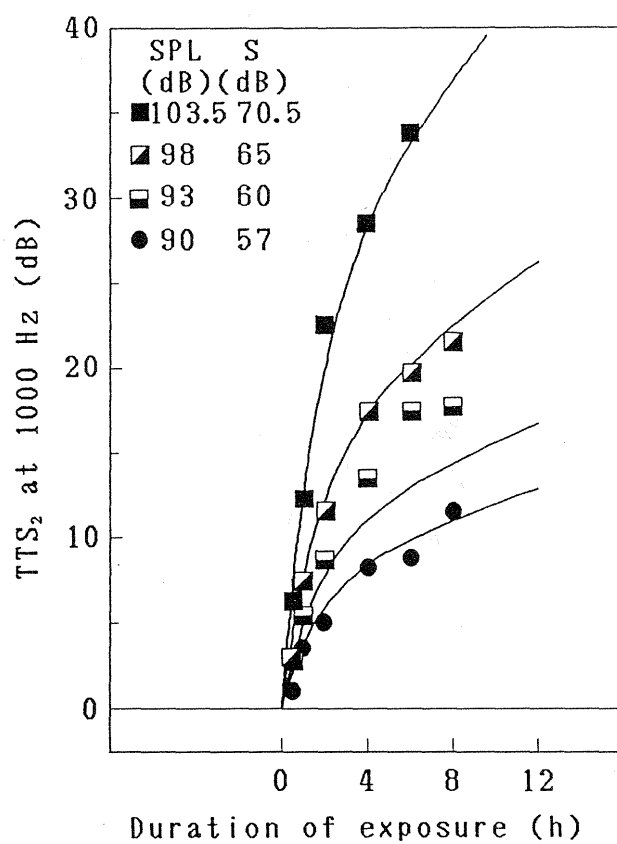


Fig. 4.15 Growth of TTS₂ at 1000 Hz. Solid curves show calculations from Eq. (4.4.2) and Eq. (4.4.5).

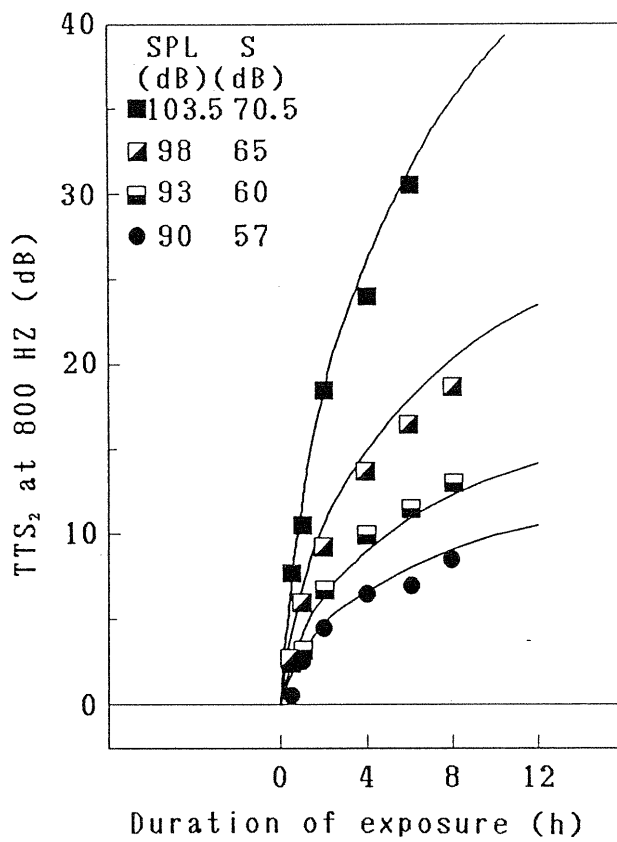


Fig. 4.16 Growth of TTS₂ at 800 Hz. Solid curves show calculations from Eq. (4.4.2) and Eq. (4.4.5).

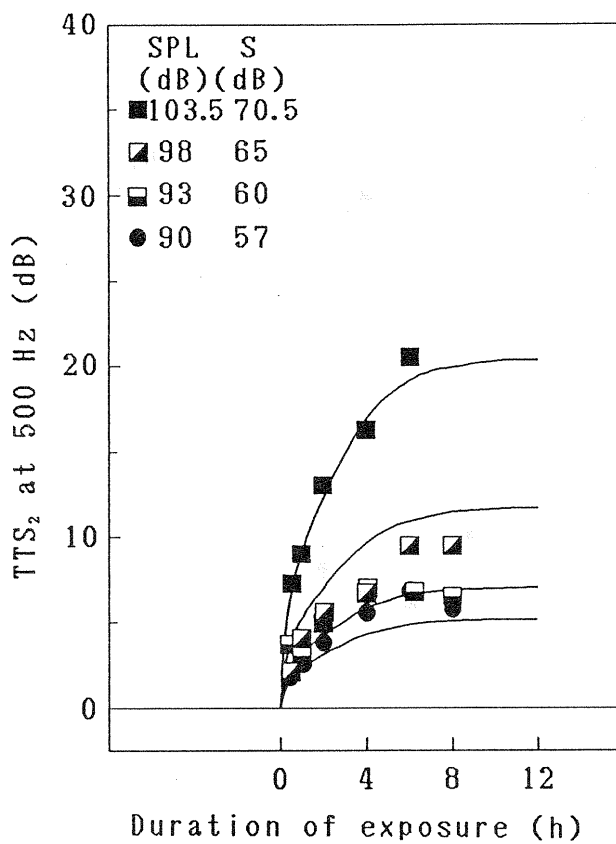


Fig. 4.17 Growth of TTS₂ at 500 Hz. Solid curves show calculations from Eq. (4.4.2) and Eq. (4.4.5).

また、式(4.4.5)において、 $T_1 \ll T_2$ である場合、 $0 \leq t < 3T_1$ の間は、分母は $\{1 + m \exp(-t/T_2)\} \simeq (1+m)$ であり、次式のように、1次遅れ系の指数関数による増大が支配的となる。

$$\begin{aligned} \text{TTS}_0(S, t) &\simeq K'(S) \{1 - \exp(-t/T_1)\} \\ K'(S) &= K(S)/(1+m) = a \exp(bS)/(1+m) \end{aligned} \quad (4.4.6)$$

これが、 $t > 3T_1$ となると、分子の $\{1 - \exp(-t/T_1)\}$ は、 $\simeq 1$ となり、式(4.4.5)は、次式のように logistic 曲線による増大が支配的となる。

$$\text{TTS}_0(S, t) \simeq K(S)/\{1 + m \exp(-t/T_2)\} \quad (4.4.7)$$

なお、Table 4.11 より、 T_2/T_1 の比の値は、4.2~27.8 の範囲にある。式(4.4.6)、(4.4.7)の右辺は、TTS を y とおくと、それぞれ次のような微分方程式から導出される関数形である。

$$\frac{dy}{dt} = r_1 (K - y) \quad (4.4.8)$$

$$\frac{dy}{dt} = r_2 y (K - y) \quad (4.4.9)$$

ただし、 r_1 、 r_2 は定数、 K は ATS を表す定数である。上記方程式と聴覚生理の関連については興味深いところであるが、今後の検討に待ちたい。

4.5 結論

低レベル・長時間騒音暴露にまで、適用可能な TTS の増大の予測式を導出する目的で、過去に行われた8時間白色騒音暴露実験及び24時間白色騒音暴露実験で得られたデータに、種々の関数形を、最小二乗法を用いて当てはめた。その結果、テスト周波数 0.5, 0.8, 1, 1.5, 2, 3, 4, 6, 8 kHz のそれぞれについて、広いレベル範囲(65~95 dB SPL)にわたる、長時間(24時間まで)の騒音暴露に適用できる TTS の予測式が、以下のよう求められた。

テスト周波数: 0.5 kHz

$$TTS_0(S, t) = 0.016 \exp(0.102 S) \frac{1 - \exp(-t/15.7)}{1 + 2.00 \exp(-t/105.0)}$$

テスト周波数: 0.8 kHz

$$TTS_0(S, t) = 0.037 \exp(0.101 S) \frac{1 - \exp(-t/62.0)}{1 + 1.77 \exp(-t/257.4)}$$

テスト周波数: 1 kHz

$$TTS_0(S, t) = 0.115 \exp(0.090 S) \frac{1 - \exp(-t/94.1)}{1 + 1.62 \exp(-t/617.3)}$$

テスト周波数: 1.5 kHz

$$TTS_0(S, t) = 1.347 \exp(0.054 S) \frac{1 - \exp(-t/44.8)}{1 + 1.47 \exp(-t/352.0)}$$

テスト周波数: 2 kHz

$$TTS_0(S, t) = 0.063 \exp(0.102 S) \frac{1 - \exp(-t/13.4)}{1 + 1.61 \exp(-t/179.9)}$$

テスト周波数: 3 kHz

$$TTS_0(S, t) = 0.118 \exp(0.103 S) \frac{1 - \exp(-t/41.8)}{1 + 1.16 \exp(-t/182.7)}$$

テスト周波数: 4 kHz

$$TTS_0(S, t) = 0.106 \exp(0.114 S) \frac{1 - \exp(-t/31.8)}{1 + 1.04 \exp(-t/337.6)}$$

テスト周波数: 6 kHz

$$TTS_0(S, t) = 0.261 \exp(0.098 S) \frac{1 - \exp(-t/14.8)}{1 + 1.07 \exp(-t/412.0)}$$

テスト周波数: 8 kHz

$$TTS_0(S, t) = 0.110 \exp(0.112 S) \frac{1 - \exp(-t/17.0)}{1 + 1.41 \exp(-t/458.6)}$$

ただし, TTS_0 : 暴露終了直後の TTS (dB)

S : 暴露音の TTS の臨界帯域の中心周波数におけるスペクトルレベル
(dB)

t : 暴露時間 (min)

である。

参考文献

- 1) K. Takagi, T. Yamamoto and H. Shoji "Permissible noise criteria for hearing conservation" 7th Int. Cong. Acoust. Budapest, 2582, 777-780 (1970).
- 2) 高木興一, "産業騒音の許容値に関する研究," 京都大学工学博士論文 (1968).
- 3) T. Yamamoto, K. Takagi, H. Shoji and H. Yoneda, "Critical band with respect to temporary threshold shift," J. Acoust. Soc. Am. 48, 978-987 (1970).
- 4) W.D. Ward, A. Glorig and D.L. Sklar, "Dependence of temporary threshold shift at 4 Kc on intensity and time," J. Acoust. Soc. Am. 30, 944-954 (1958).
- 5) J.H. Mills, R.M. Gilbert and W.Y. Adkins, "Temporary threshold shifts in humans exposed to octave bands of noise for 16 to 24 hours," J. Acoust. Soc. Am. 65, 1238-1248 (1979).
- 6) J.S. Keeler, "Models for noise-induced hearing loss," in Effects of Noise on Hearing, D. Henderson, R.P. Hamernik, D.S. Dosanjh and J.H. Mills, Eds. (Raven Press, New York, 1976), p.361.
- 7) K.R. Maslen, "A simple Mathematical model for TTS," Applied Acoustics 16, 1-10 (1983).
- 8) T. Yamamoto, H. Shoji and K. Takagi, "Prediction of temporary threshold shift following exposure to noise having arbitrary spectrum and temporal characteristics," 6th Int. Cong. Acoust. Tokyo, A-2-8, A-9—A-12 (1968).
- 9) 山本剛夫, 高木興一, 庄司 光, 米田明彦, "TTS_t から TTS₂ への変換," 産業医学 11, 445-448 (1969).
- 10) 平松幸三, 騒音の評価法, 日本建築学会編 (彰国社, 東京, 1981), p.243.
- 11) 坂元慶行, 石黒真木夫, 北川源四郎, 情報量統計学 (共立出版, 東京, 1983).

第5章 変動騒音暴露に対してTTSの増大の式を適用する上での二、三の考察

5.1 はじめに

第4章では、定常騒音暴露によるTTSの成長曲線の定式化を試みて、種々のテスト周波数について、暴露レベル及び暴露時間を独立変数とするTTSの増大の実験式を作成した。これらの式は、あくまでも定常騒音暴露実験の結果に基づいて作成したものであり、暴露レベルが時間とともに変化する変動騒音暴露の場合についても、TTSの予測計算が可能であるかどうか検討しておく必要がある。とりわけ一般環境騒音は、時間的に大きく変動することが予想されるため、環境騒音暴露によるTTSを予測するためには、こういった検討は不可欠である。従来の山本・高木のTTSの増大の式¹⁾においても、単位階段関数法を採用することにより、変動騒音暴露によるTTSの予測が可能であることが報告されている²⁾。本章では、本研究で作成した新たな実験式の場合でも、同様な予測計算を行いうるかどうか検討することを目的としている。

まず、5.2及び5.3において過去に行なわれた変動騒音暴露実験のうち、実験条件が良く管理されており、以下に掲げる条件が満たされているものを取り上げ、その実験結果と予測計算結果を比較検討した。その条件とは、例えば、定常騒音暴露の場合のデータが存在するか、もしくは対象とするテスト周波数についてのTTSの臨界帯域内のスペクトルレベルが推定可能であること、一連の暴露条件について、同一の被験者に対して行なわれていること、暴露終了後の休止時間 τ の値が判明していること、良く訓練された被験者について自記オーディオメータなど用いて精度の良い域値測定が行なわれていることなどが挙げられる。

次いで、5.4においては、TTSの回復過程について考察を加えた。本研究では、TTSの増大過程についての実験データを得ることができたが、その回復過程については、実験データを得ることはできなかった。単位階段関数法²⁾に従えば、回復過程は、増大の式の符号を逆転して当てはめるとなると思われるが、果してそれで妥当な結果が得られるのかどうかについて検討を行った。

5.2 変動騒音暴露による TTS の予測について

5.2.1 暴露実験の概要

ここで取り上げる暴露実験は、中本³⁾のものである。暴露騒音は白色騒音であり、そのレベルを時間的に変動させた。またその帯域幅は、第3章で用いたものよりもやや広がっている。暴露音は、連続騒音と断続騒音とに大別される。

連続騒音暴露の場合は、オーバーオール音圧レベルで、85, 90, 95, 100 dB SPL の定常騒音をそれぞれ 90, 90, 90, 30 min 暴露した4条件及び暴露レベルが 100 dB SPL から 85 dB SPL まで指数関数的に減衰する連続騒音 (Fig. 5.1) を 30 min 暴露するものを加えた合計5条件である。各条件ともに、暴露実験中の一定時間に暴露を休止して、域値を測定し、TTS の成長過程を記録している。その際の休止時間は、暴露時間に算入されていない。

断続騒音暴露の場合は、on-time を 1 min とし、off-time を 1 min とするもので、duty cycle は 2 min, on fraction は 0.5 である。on-time の間のレベル変動のエンベロープの形については、時間的に変動のない矩形波形のものについて、暴露レベル 90, 95, 100 dB SPL の3条件を取り上げ、さらに、1 min の間に 85 dB SPL から 100 dB SPL までレベルが指数関数的に増加する指数波形 I (Fig. 5.2), 前半 30 s で 85 dB SPL から 100 dB SPL まで増加して、後半 30 s で再び 85 dB SPL まで減衰するレベル変動を指数関数で模擬した指数波形 II (Fig. 5.3), 正弦波で模擬した正弦波形 (Fig. 5.4), 航空機騒音の時間変動で模擬した Noise J (Fig. 5.5) を加えた合計7条件である。断続回数は 15 ないし 45 回で、この場合もまた暴露実験中の一定の off-time の間に、域値を測定して TTS の増大過程を記録している。以上の実験条件を Table 5.1 に一括して掲載した。

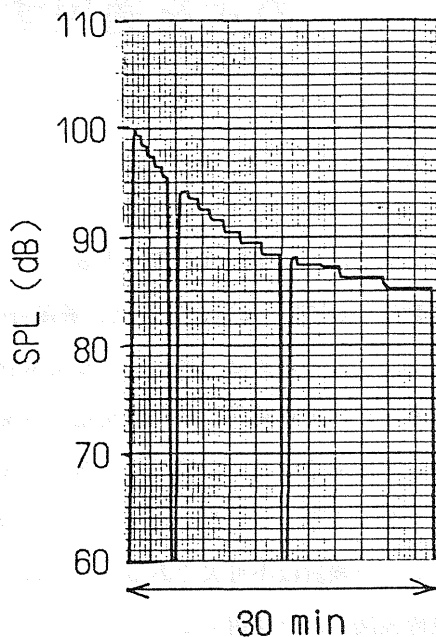


Fig. 5.1 Level fluctuation of continuous noise exposure whose level decreases exponentially. Writing speed is 16 dB/s.

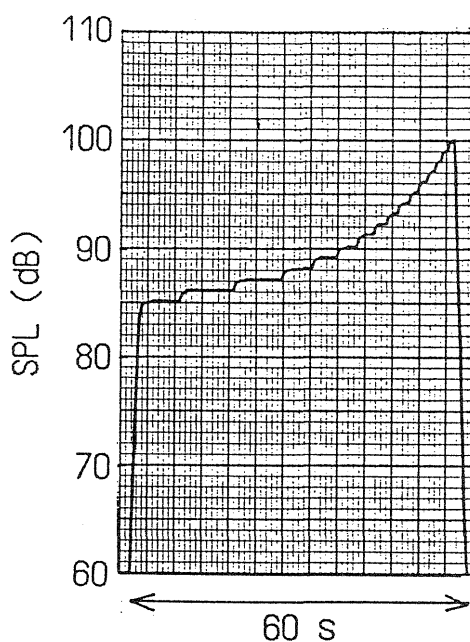


Fig. 5.2 A time pattern of exponentially fluctuating noise (Exponential envelope I). Writing speed is 16 dB/s.

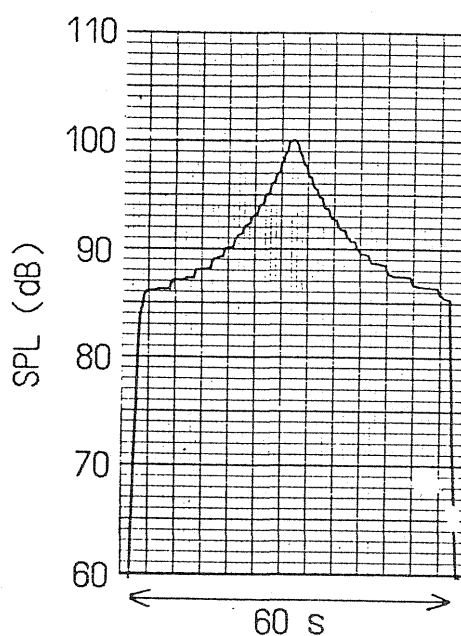


Fig. 5.3 A time pattern of exponentially fluctuating noise (Exponential envelope II). Writing speed is 16 dB/s.

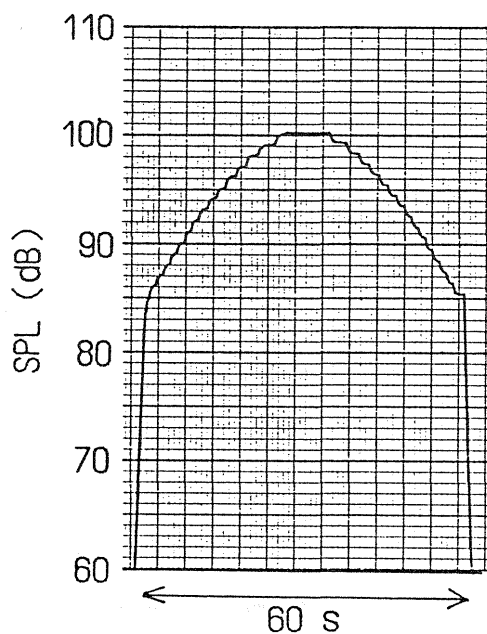


Fig. 5.4 A time pattern of sinusoidally fluctuating noise (Sinusoidal envelope). Writing speed is 16 dB/s.

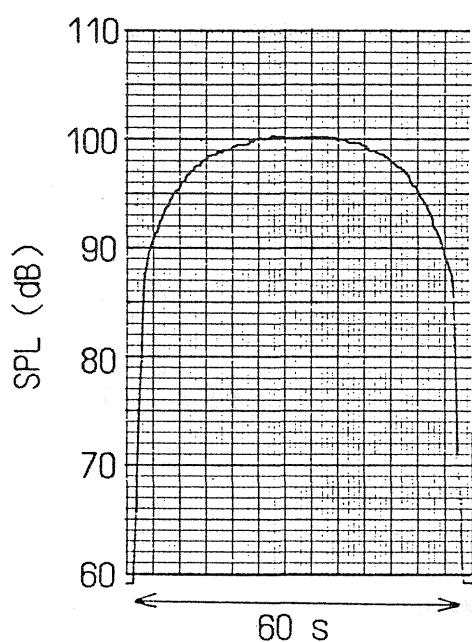


Fig. 5.5 A time pattern of fluctuating noise (Noise J). Writing speed is 16 dB/s.

Table 5.1 Experimental conditions used by Nakamoto³⁾.

Exposure noise	Exposure level	Duration of exposure
Continuous noise		
Steady-state	85, 90, 95, 100 dB SPL	30 or 90 min
Exponentially decrease	85~100 dB SPL	30 min
Intermittent noise		
Rectangular envelope	90, 95, 100 dB SPL	37 or 45 cycles (73 or 89 min)
Exponentially envelope I	85~100 dB SPL	45 cycles (89 min)
Exponentially envelope II	85~100 dB SPL	45 cycles (89 min)
Sinusoidally envelope	85~100 dB SPL	45 cycles (89 min)
Noise J	85~100 dB SPL	15 cycles (29 min)

テスト周波数は 4 kHz であり、暴露停止後 10 s から 50 s まで自記オーディオメータを用いて域値を測定している。つまり $TTS_{0.5}$ を測定したことに相当する。

暴露は防音無響室内で、つまり自由音場に近い条件の下で、1名の被験者が、スピーカから放射される暴露騒音に一耳を向ける方法がとられている。これは第2章 2.2.2 における自由音場下での騒音暴露実験とほぼ同一の方法である。

被験者の数は、当初5名で行われている。しかし、1名については、TTSの値が他の4名に比べて異常に大きくなることが多く、被験者の聴力保護のため実験を途中で打ち切ったために欠測値が生じていることもあり、今回はこの1名を除いた4名のデータを取り上げ、その平均値について検討した。

5.2.2 実験結果と予測計算の結果

まず、第4章で作成した実験式を中本の実験データに適用するにあたり、第4章で採用した暴露実験の白色騒音の帯域幅と、中本のそれとは異なるため、オーバーオール音圧レベルの値 SPL が同一であっても、スペクトルレベル S の値が一致しないことが考えられる。そこで、 $SPL - S$ (この値は白色騒音の場合、その帯域幅を dB 表示したものに相当する) の値を変化させて、中本の定常騒音暴露のデータに第4章で作成した実験式を当てはめたところ、 $S = SPL - 39.38$ とした場合に残差平方和が最小となった。第4

章ではこの $SPL - S$ の値は 38 dB であり、中本の実験で用いられた白色騒音の帯域幅の方が、第4章で採用した暴露実験で用いられたそれより広がっていることから見て、この 39.38 dB は妥当な値と考えられる。これを式で表すと次のようになる。

$$TTS_0(SPL, t) = 0.106 \exp\{0.114(SPL - 39.38)\} \frac{1 - \exp(-t/31.8)}{1 + 1.04 \exp(-t/337.6)}$$

$$TTS_{0.5} = TTS_0(SPL, t + 0.5) - TTS_0(SPL, 0.5) \quad (5.1)$$

また、第4章で述べたように、今回作成した実験式は、暴露時間が短い間 ($0 \leq t < 3T_1$) は、分子の1次遅れ系の指数関数による growth が支配的となる。さらに、中本のデータはすべて $TTS_{0.5}$ であるため、音圧レベル SPL と暴露時間 t から直接 $TTS_{0.5}$ を算出する実験式を1次遅れ系の指数関数を用いて、最小二乗法を用いて求めたところ、次式を得た。

$$TTS_{0.5}(SPL, t) = 0.00588 \exp(0.0898 SPL) \{1 - \exp(-t/28.4)\} \quad (5.2)$$

さらに、従来の山本・高木の実験式¹⁾で採用されている対数式と同様な関数形を当てはめたところ、次式を得た。なおここでも第4章と同じく対数の引数が0となることを避けるため $t+1$ を採用した。

$$TTS_{0.5}(SPL, t) = 1.10(SPL - 78.6) \log_{10}(t+1) - 0.325 SPL + 23.96 \quad (5.3)$$

上記の式(5.1)、(5.2)、(5.3)を定常騒音暴露実験データ($n = 29$)に当てはめた場合の残差平方和は、それぞれ 156.47, 105.58, 65.22 となり、式(5.3)の場合が3者では最小となる。Fig. 5.6 に定常騒音暴露実験データと各実験式による予測計算値を図示した。図中、実線、破線、一点鎖線がそれぞれ式(5.1)、(5.2)、(5.3)による値を表している。図より分かるように、残差平方和が最も小さくなる式(5.3)の場合では $t=0$ の付近で TTS は負の値をとる不都合が生じる。

以上3式を、まず断続騒音暴露に、単位階段関数法²⁾を用いて適用して得られた予測計算結果を Fig. 5.7~5.13 に実験データと共に図示した。数値計算にあたり、レベル変動を単位階段関数で近似する際の時間刻みは、最小 1 s までとした。なお実験データには、平均値の 95 %信頼限界も併せて表示した。また、各実験式を当てはめた場合の残差平方和を Table 5.2 に掲載した。

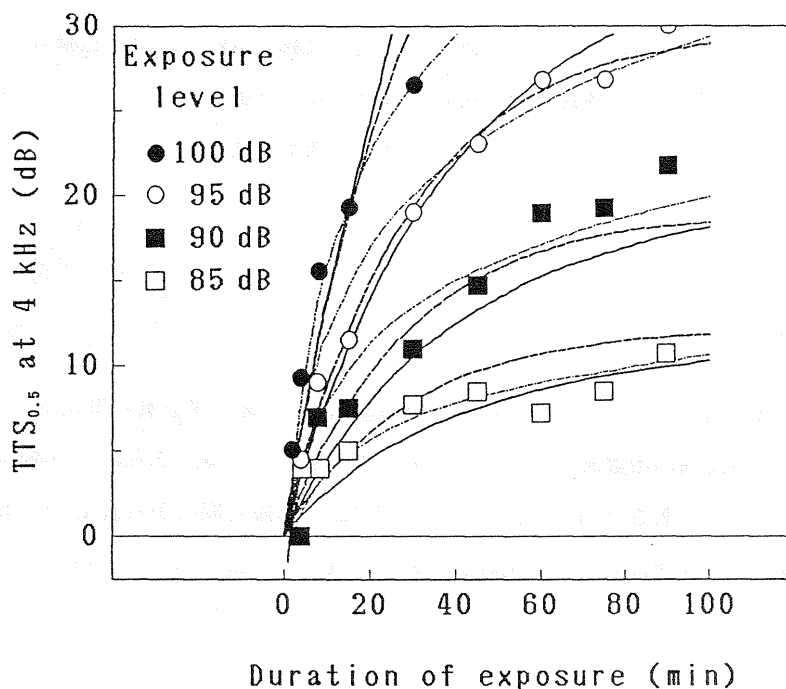


Fig. 5.6 Growth of TTS_{0.5} at 4 kHz induced by continuous steady-state noise exposure. TTSs are the mean values over four subjects. Solid, broken and chain curves show calculations from Eq. (5.1), Eq. (5.2) and Eq. (5.3) respectively.

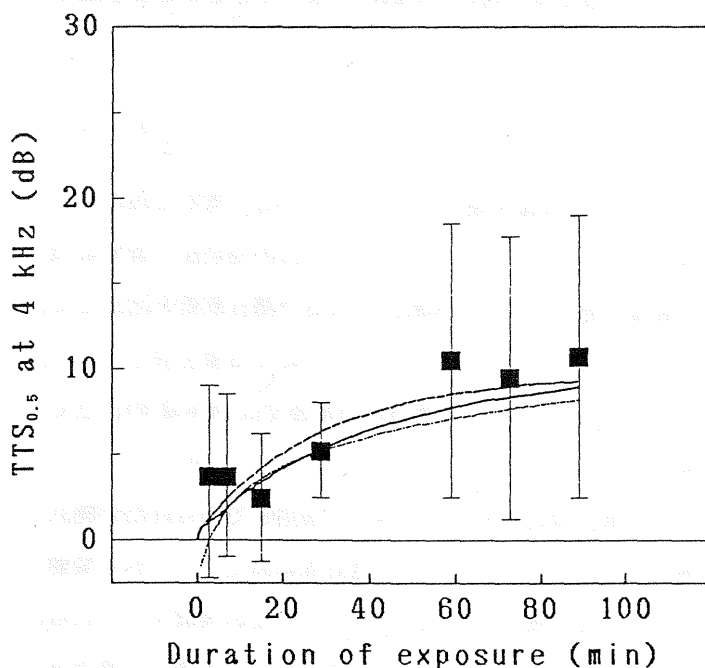


Fig. 5.7 Growth of TTS_{0.5} at 4 kHz induced by intermittent noise exposure. Time pattern of exposure noise is the rectangular envelope and the peak level is 90 dB SPL. Symbols indicate the mean values of four subjects and vertical bars show their 95% confidence limits. Solid, broken and chain curves show calculations from Eq. (5.1), Eq. (5.2) and Eq. (5.3) respectively.

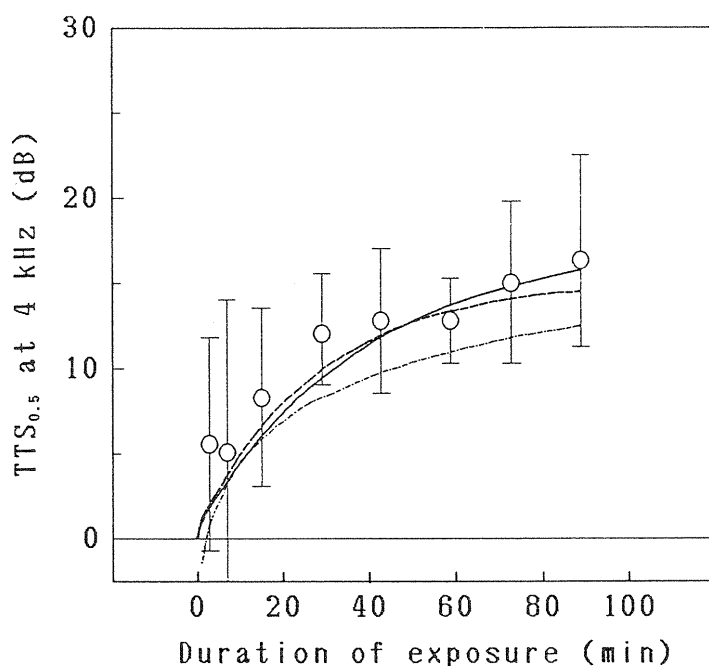


Fig. 5.8 Growth of $TTS_{0.5}$ at 4 kHz induced by intermittent noise exposure. Time pattern of exposure noise is the rectangular envelope and the peak level is 95 dB SPL. Symbols indicate the mean values of four subjects and vertical bars show their 95% confidence limits. Solid, broken and chain curves show calculations from Eq. (5.1), Eq. (5.2) and Eq. (5.3) respectively.

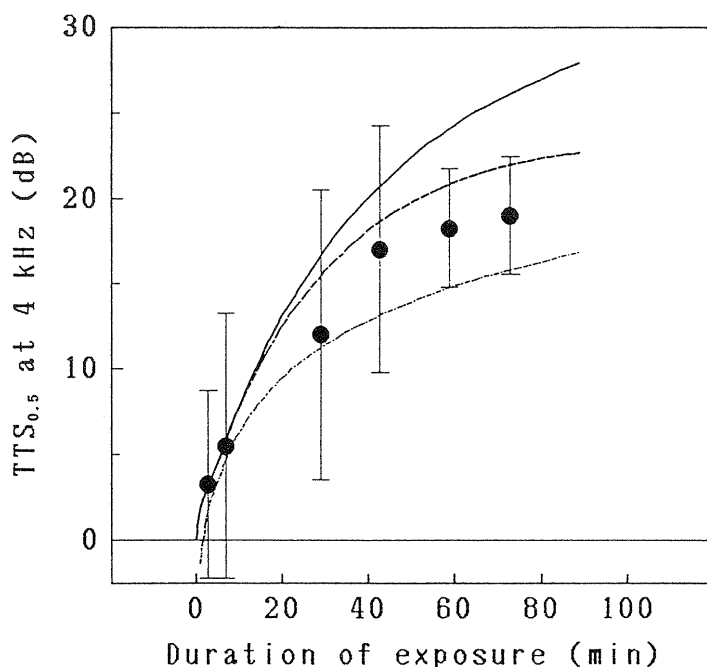


Fig. 5.9 Growth of $TTS_{0.5}$ at 4 kHz induced by intermittent noise exposure. Time pattern of exposure noise is the rectangular envelope and the peak level is 100 dB SPL. Symbols indicate the mean values of four subjects and vertical bars show their 95% confidence limits. Solid, broken and chain curves show calculations from Eq. (5.1), Eq. (5.2) and Eq. (5.3) respectively.

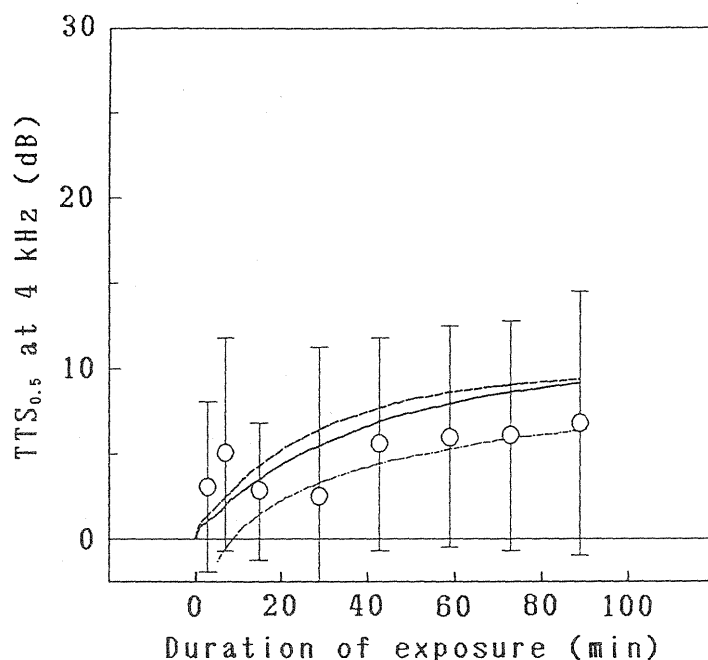


Fig. 5.10 Growth of $TTS_{0.5}$ at 4 kHz induced by intermittent noise exposure. Time pattern of exposure noise is the exponential envelope I. Symbols indicate the mean values of four subjects and vertical bars show their 95% confidence limits. Solid, broken and chain curves show calculations from Eq. (5.1), Eq. (5.2) and Eq. (5.3) respectively.

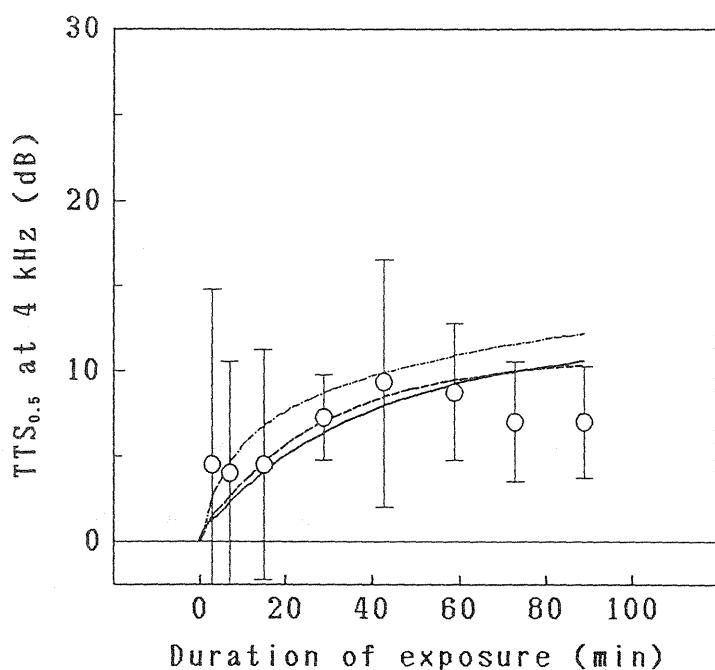


Fig. 5.11 Growth of $TTS_{0.5}$ at 4 kHz induced by intermittent noise exposure. Time pattern of exposure noise is the exponential envelope II. Symbols indicate the mean values of four subjects and vertical bars show their 95% confidence limits. Solid, broken and chain curves show calculations from Eq. (5.1), Eq. (5.2) and Eq. (5.3) respectively.

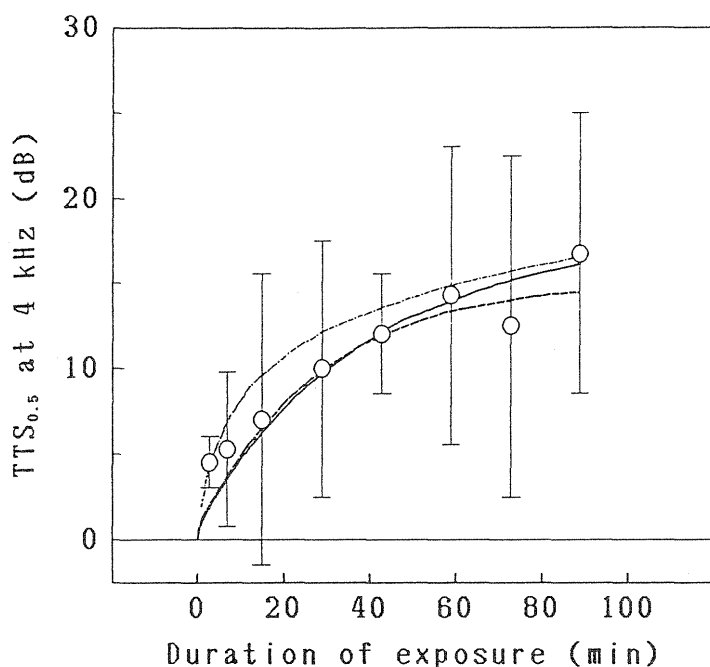


Fig. 5.12 Growth of $TTS_{0.5}$ at 4 kHz induced by intermittent noise exposure. Time pattern of exposure noise is the sinusoidal envelope. Symbols indicate the mean values of four subjects and vertical bars show their 95% confidence limits. Solid, broken and chain curves show calculations from Eq. (5.1), Eq. (5.2) and Eq. (5.3) respectively.

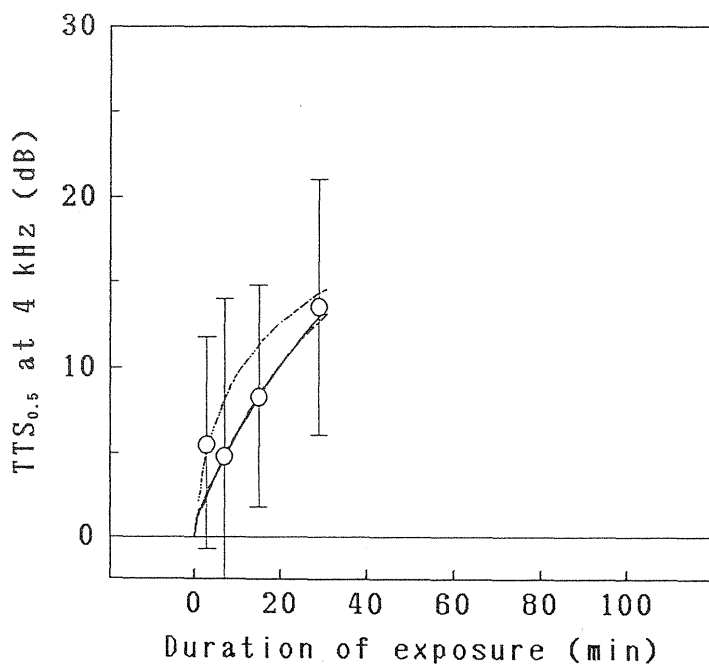


Fig. 5.13 Growth of $TTS_{0.5}$ at 4 kHz induced by intermittent noise exposure. Time pattern of exposure noise is the Noise J. Symbols indicate the mean values of four subjects and vertical bars show their 95% confidence limits. Solid, broken and chain curves show calculations from Eq. (5.1), Eq. (5.2) and Eq. (5.3) respectively.

Table 5.2 Comparison of the sum of residuals between Eq. (5.1), Eq. (5.2) and Eq. (5.3)

Exposure noise	n	Eq. (5.1)	Eq. (5.2)	Eq. (5.3)
Rectangular envelope				
90 dB SPL	7	24.40	18.37	40.01
95 dB SPL	8	32.20	27.30	84.49
100 dB SPL	7	203.98	47.43	45.32
Exponential envelope I	8	40.54	52.53	118.18
Exponential envelope II	8	36.75	30.99	24.81
Sinusoidal envelope	8	19.12	17.30	11.84
Noise J	4	9.89	9.61	10.35

n : Number of data

ここで式 (5.1), (5.2), (5.3) について表中の残差平方和を合計してみると, それぞれ 366.88, 203.53, 335.00 となるので, 式 (5.2), (5.3), (5.1) の順に実験データに適合していると見ることができる。ただし, (5.1) 式は, 矩形波形 100 dB SPL の場合に, 他の波形に比べて大きな値をとることが分かる。これは, 100 dB SPL という騒音暴露が, 第4章で作成した実験式の暴露レベルの適用範囲の 65~95 dB SPL を逸脱しているために, 実験データに追随しなかったとも考えられる。そこで, 矩形波形 100 dB SPL を除いて, Table 5.2 の残差平方和を合計すると, 前述の値は, それぞれ 162.90, 156.10, 289.68 となり, この場合は, 式 (5.1) と式 (5.2) とは同程度の適合度で, 式 (5.3) は前二者より適合度は良くないと言える。Fig. 5.7~5.13 においても, 式 (5.3) の場合では, $t=0$ の付近で連続性に欠ける挙動を示している。

次に, 指数関数形で模擬したレベル変動をもつ連続騒音暴露実験のデータに, TTS の実験式を当てはめた結果を Fig. 5.14 に図示した。レベル変動を単位階段関数で近似する際の時間刻みは, レベルが 1 dB 変化するたびに設定したところ, 30~300 s の範囲となった。近似式 (5.1), (5.2), (5.3) をあてはめた場合の残差平方和 ($n=4$) は, それぞれ 37.37, 21.45, 19.20 となり, 従来の実験式と同様な関数形の対数式の場合が最も小さくなる。しかし, この式 (5.3) の場合は, 図より明らかなように 13 min 付近で TTS は極大値をとり以降減少している。実測値の場合は, データ数は少ないが暴露時間とともに単調増加しており, これは式 (5.1), (5.2) による予測値の挙動と一致している。

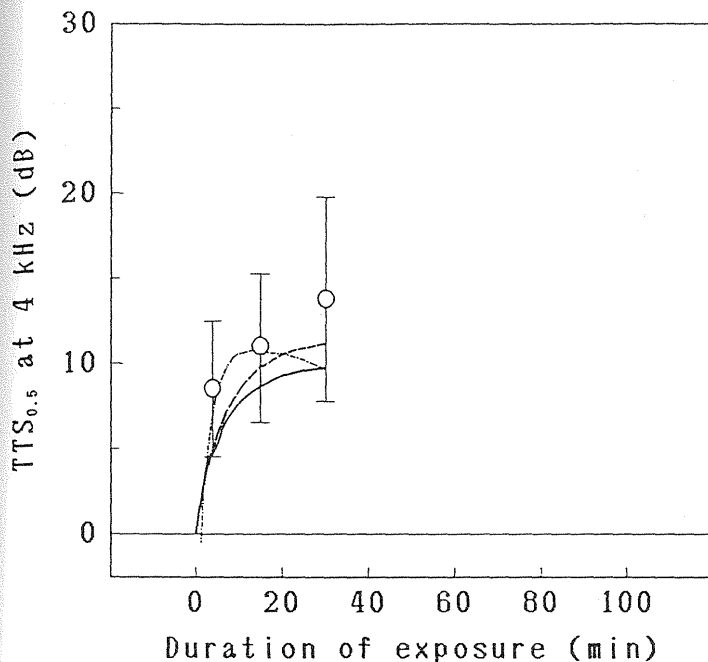


Fig. 5.14 Growth of $TTS_{0.5}$ at 4 kHz induced by continuous exponentially decreasing noise exposure. Symbols indicate the mean values of four subjects and vertical bars show their 95% confidence limits. Solid, broken and chain curves show calculations from Eq. (5.1), Eq. (5.2) and Eq. (5.3) respectively.

以上の実験データについて、実測値を横軸にとり、それに対応する予測計算値をそれぞれ式(5.1)、(5.2)、(5.3)により算出して縦軸にとった相関図を Fig. 5.15~5.17 に示した。図中、黒丸は連続騒音暴露によるデータを、白丸は断続騒音暴露によるそれを表している。それぞれ相関係数は、0.951, 0.957, 0.941 であり、式(5.2)の場合が最も高く、ついで式(5.1)、(5.3)の順となっている。従って、総合的に判断すると、今回検討の対象とした3式のうち、式(5.2)を用いた予測計算結果が最も適合度が良い。同一の定常騒音暴露実験データに基づいて作成した対数式(5.3)よりも実測値に良く追随するわけで、1次遅れの指数関数形と対数形の比較では、今回は前者の方がより適合度が高いといえる。また、第4章で作成した実験式(5.1)の場合でも、暴露レベルの適用範囲から大きくはずれなければ、式(5.2)と同程度の予測計算が可能である。このことにより、第4章で作成した実験式は、導出の基礎となった実験データが異なっていながら、暴露レベルを調整するだけで、他の実験データにも適用できる汎用性の高いものであることが明らかとなった。

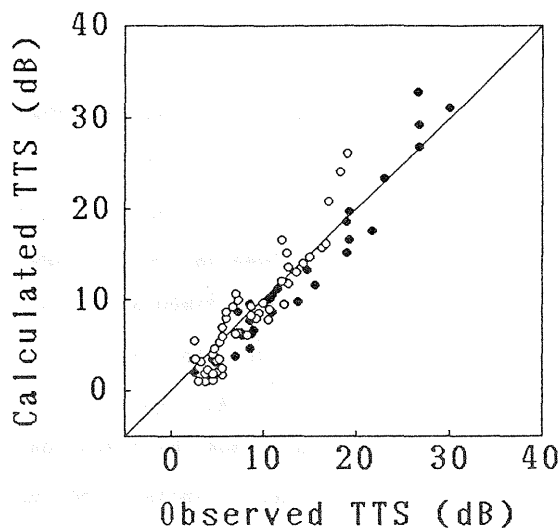


Fig. 5.15 The relation between $TTS_{0.5}$ at 4 kHz observed in the experiment and those calculated from Eq. (5.1). Solid circles indicate the data from continuous noise exposures, and open circles indicate those from intermittent noise exposures.

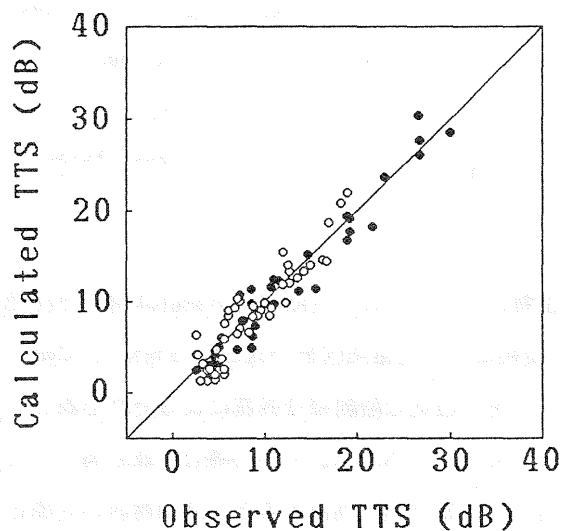


Fig. 5.16 The relation between $TTS_{0.5}$ at 4 kHz observed in the experiment and those calculated from Eq. (5.2). Solid circles indicate the data from continuous noise exposures, and open circles indicate those from intermittent noise exposures.

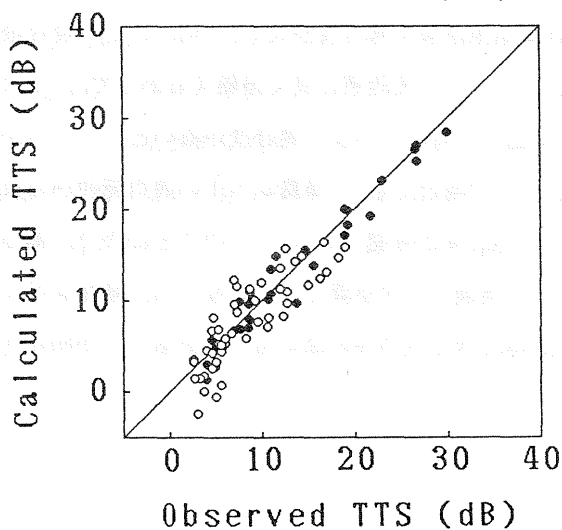


Fig. 5.17 The relation between $TTS_{0.5}$ at 4 kHz observed in the experiment and those calculated from Eq. (5.3). Solid circles indicate the data from continuous noise exposures, and open circles indicate those from intermittent noise exposures.

さらに、矩形波形の場合に、on fraction rule⁴⁾が成立しているかどうかを検討してみる。例えば、矩形波形の 90, 95, 100 dB SPL の 15 回目の on-time 直後の $TTS_{0.5}$ は、実験データでは、それぞれ 5.25, 12.25, 12.00 dB である。これに相当する定常騒音を 30 min 暴露した時点における $TTS_{0.5}$ は、それぞれ各暴露レベルについて 11.00, 19.50, 26.50 dB である。後者の値に対する前者の値の比は、それぞれ 0.48, 0.64, 0.45 となり、on fraction の 0.5 前後の値である。これは、上記の実験データの代わりに式 (5.1) による予測計算値で試算すると、断続暴露 (on-time 15 回) の場合、 $TTS_{0.5}$ は 6.31, 9.88, 15.48 dB であり、定常暴露 (暴露時間 30 min) では、それぞれ 12.41, 19.44, 30.46 dB となり、後者に対する前者の比は、いずれの暴露レベルにおいても 0.51 となる。つまり on fraction rule が成立しているとみなし得る。

次いで、レベル変動のある断続暴露の場合、等エネルギー仮説が成立するかどうかの検討を、これもまた式 (5.1) による予測計算値を用いて行ってみる。矩形波形の暴露レベルを SPL とすると、矩形波形 on-time 15 回目直後の $TTS_{0.5}$ は、数値計算の結果

$$TTS_{0.5} = 0.00195 \exp(0.0898 SPL) \quad (5.4)$$

と表される。レベル変動のある断続暴露では、同様の時点における $TTS_{0.5}$ の予測値は、指数波形 I, 指数波形 II, 正弦波形, Noise J のそれぞれについて 6.31, 7.02, 9.84, 12.57 dB となる。式 (5.4) から、各波形と等価な $TTS_{0.5}$ を引き起こすと考えられる矩形波形の暴露レベル (ここでは L_E と表す) を求めると、それぞれ 90.0, 91.2, 94.9, 97.7 dB SPL である。各波形の等価騒音レベル L_{eq} は、それぞれ 91.4, 92.8, 96.2, 98.2 dB SPL で L_E と L_{eq} の相関係数は 0.997 と高く、横軸に L_E 、縦軸に L_{eq} をとった場合の回帰直線の傾きも 0.881 と 1 に近く、等エネルギー仮説が成立しているようにも見える。しかし、各波形の代表値としてレベルの算術平均値 \bar{L} をとった場合、それぞれ 89.2, 90.3, 93.9, 97.2 dB SPL となり、この場合の相関係数は 0.999、傾きは 1.033 と、むしろ L_E との関係は L_{eq} よりも 1 : 1 に近い。TTS に関しては L_{eq} は必ずしも万能ではないと言える。この節で検討してきたように、TTS の増大の式と単位階段関数法を用いた方がより、合理的な予測計算ができるものと思われる。等エネルギー仮説については、次節においても検討を加える予定である。

5.3 持続時間の短い断続騒音暴露による TTS の予測について

5.3.1 暴露実験の概要

ここで取り上げる暴露実験は、山本ら⁵⁾のものである。暴露騒音は白色騒音であり、その帯域は 900 Hz～9 kHz と第3章の実験で用いたものとほぼ同じである。この実験では duty cycle を 1 s として、on-time を 25～800 ms と変化させ、それに応じて暴露エネルギーが等しくなるように、音圧レベルを 114～99 dB SPL と変化させている。断続騒音は on-time の間のレベル変動はなく、矩形のエンベロープを持っている。また、断続騒音とエネルギーが等しい定常騒音 (98 dB SPL) も暴露騒音として採用している。以上の6種類の暴露騒音の物理特性を Table 5.3 に示した。この実験は、on fraction rule⁴⁾の適用範囲外とされる、非常に短い on-time の領域を対象として、その領域において等エネルギー仮説が成立するかどうかの検証を行ったものである。

暴露はヘッドホンを用いて行われている。暴露時間は 40 min で、10, 20 min の時点においても暴露を中止して域値を測定している。テスト周波数は 3, 4, 6 kHz で、それぞれ $TTS_{1.5}$, TTS_2 , $TTS_{2.5}$ の時点におけるデータを得ている。被験者は、男子学生7名であり、今回はその平均値について検討した。

Table 5.3 Sound pressure levels and durations used in the experiment reported by Yamamoto, *et al.*⁵⁾.

SPL (dB)	114	111	108	105	102	99	98
On-time (ms)	25	50	100	200	400	800	
On fraction	0.025	0.050	0.100	0.200	0.400	0.800	1.000

5.3.2 実験結果と予測計算の結果

まず、この実験はヘッドホンを用いた騒音暴露であるため、スピーカを用いての自由音場または拡散音場における騒音暴露実験の結果を基礎としている第4章の実験式は、そのままでは適用できない。そこで、前節と同様に定常騒音暴露の実験データに、第4章の実験式の暴露レベルをシフトさせて適用し、その残差平方和が最小になる $SPL - S$ の値

を求めた。その結果、3, 4, 6 kHz の各テスト周波数について、それぞれ 47.16, 48.12, 52.96 dB となった。これは第3章で同様な白色騒音をスピーカで暴露した場合の 38 dB に比べて 10 dB 程度大きな値となっている。つまり、暴露音場での音圧レベルと人工耳を用いて測定したヘッドホン出力のそれが等しい場合、内耳に伝達される音響エネルギーという面から見ると、前者の方が 10 dB 程度大きくなっていることを意味している。この点に関しては、最小可聴値を受話器を用いて測定した MAP (minimum audible pressure)の方が、自由音場で測定した MAF (minimum audible field)よりも 6~10 dB 高くなる⁶⁾ことや、第2章 2.2.1 において測定した音場からマネキンの鼓膜相当部分への音圧レベルの変換特性が、2~4 kHz の周波数域で 10~15 dB であることから説明しうる。これらの値を用いて、各暴露条件における S の値を決定し、第4章で作成した実験式を単位階段関数法²⁾を用いて、予測計算を行った(この場合の最小の時間刻みは、それぞれの on-time に相当する)。

各テスト周波数について、10, 20, 40 min 暴露時点における実験データと予測計算の結果を on-time を横軸にとり、Fig. 5.18~5.26 に図示した。図中、実測値は平均値と 95%信頼限界を用いて表示し、予測計算値は実線で表されている。図より分かるように、いずれのテスト周波数、暴露時間、on-time においても予測計算値は、ほぼ 95%信頼限界の範囲内にあり、第4章で作成した実験式を単位階段関数法を用いて適用し、TTS の予測計算を行うことの妥当性が、ここでもまた立証されたものと考ええる。

さらに Table 5.4~5.6 には、各テスト周波数、各暴露時間における各断続騒音暴露の場合の TTS の予測値と、同じ暴露レベルを持つ定常騒音暴露を行った場合の TTS の予測値を併記し、後者に対する前者の比を掲載した。この比は、実験条件として設定した on fraction と全く一致しており、25 ms 程度の on-time までなら、単位階段関数法を用いた予測計算上においても on fraction rule⁴⁾ が成立していることになる。これについては、山本ら⁵⁾ もまた、従来の実験式を用いて、単位階段関数法による予測結果と on fraction rule によるそれとが、ほぼ一致する結果を得ている。

また、等エネルギー仮説については、on-time の増加とともに TTS の予測計算値も増加することから、この暴露実験条件では成立していないと見なせるであろう。

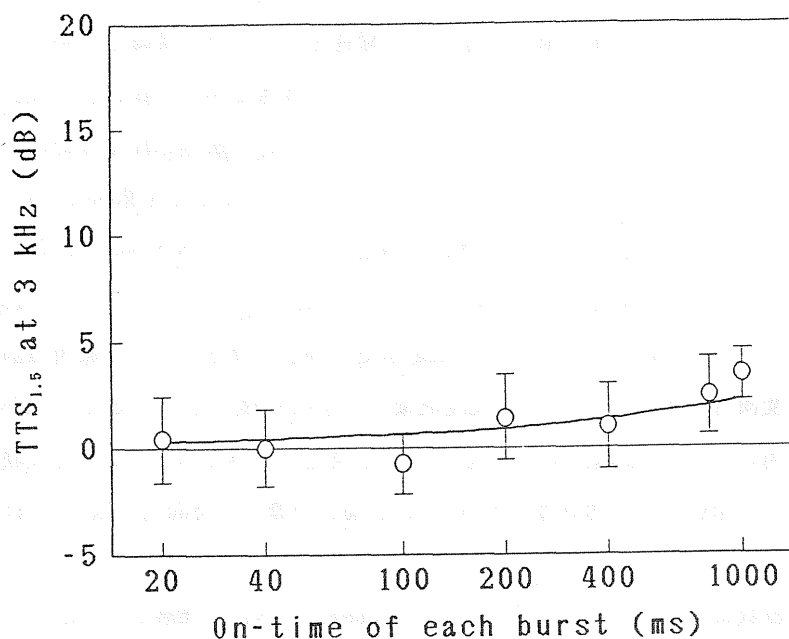


Fig. 5.18 TTS_{1.5} at 3 kHz vs. on-time. Duration of exposure is 10 min. Circles indicate the means of seven subjects and vertical bars show their 95% confidence limits. The solid curve shows the calculation from the empirical equation derived in chapter 4.

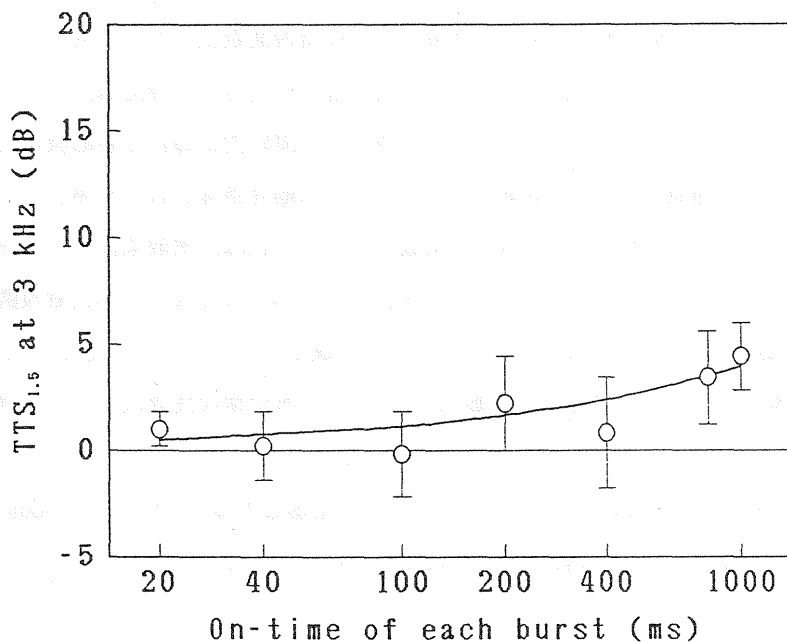


Fig. 5.19 TTS_{1.5} at 3 kHz vs. on-time. Duration of exposure is 20 min. Circles indicate the means of seven subjects and vertical bars show their 95% confidence limits. The solid curve shows the calculation from the empirical equation derived in chapter 4.

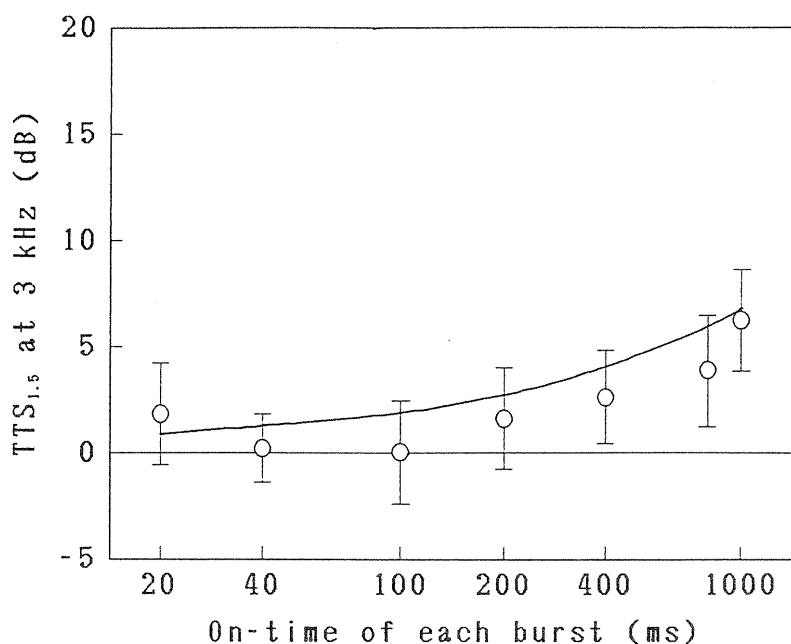


Fig. 5.20 TTS_{1.5} at 3 kHz vs. on-time. Duration of exposure is 40 min. Circles indicate the means of seven subjects and vertical bars show their 95% confidence limits. The solid curve shows the calculation from the empirical equation derived in chapter 4.

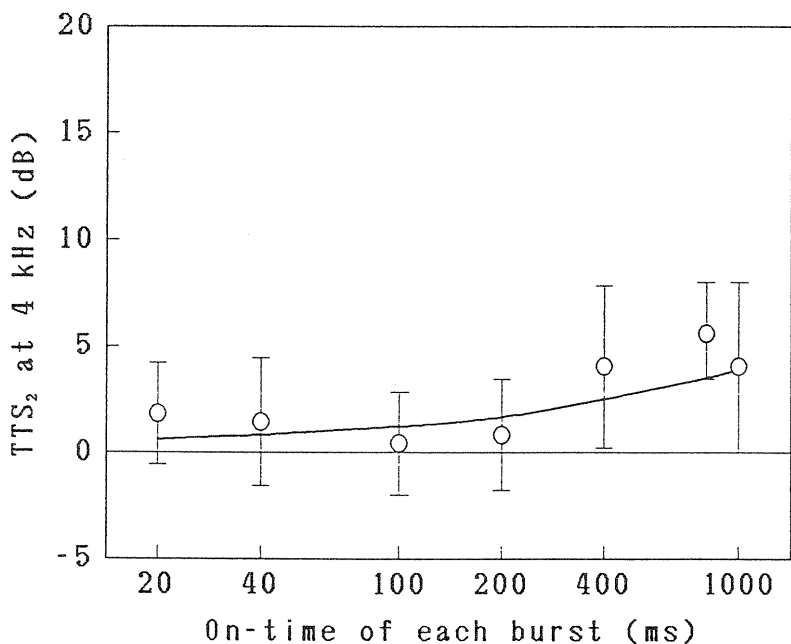


Fig. 5.21 TTS₂ at 4 kHz vs. on-time. Duration of exposure is 10 min. Circles indicate the means of seven subjects and vertical bars show their 95% confidence limits. The solid curve shows the calculation from the empirical equation derived in chapter 4.

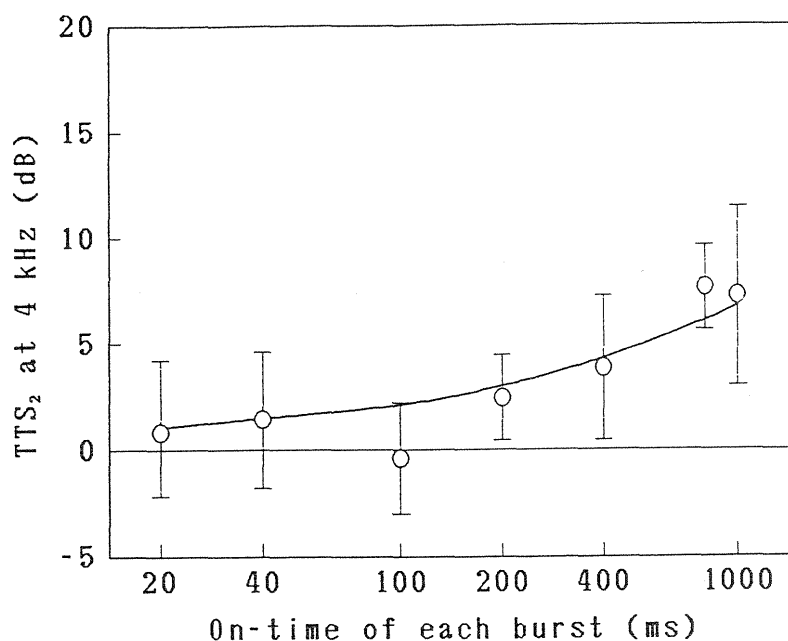


Fig. 5.22 TTS₂ at 4 kHz vs. on-time. Duration of exposure is 20 min. Circles indicate the means of seven subjects and vertical bars show their 95% confidence limits. The solid curve shows the calculation from the empirical equation derived in chapter 4.

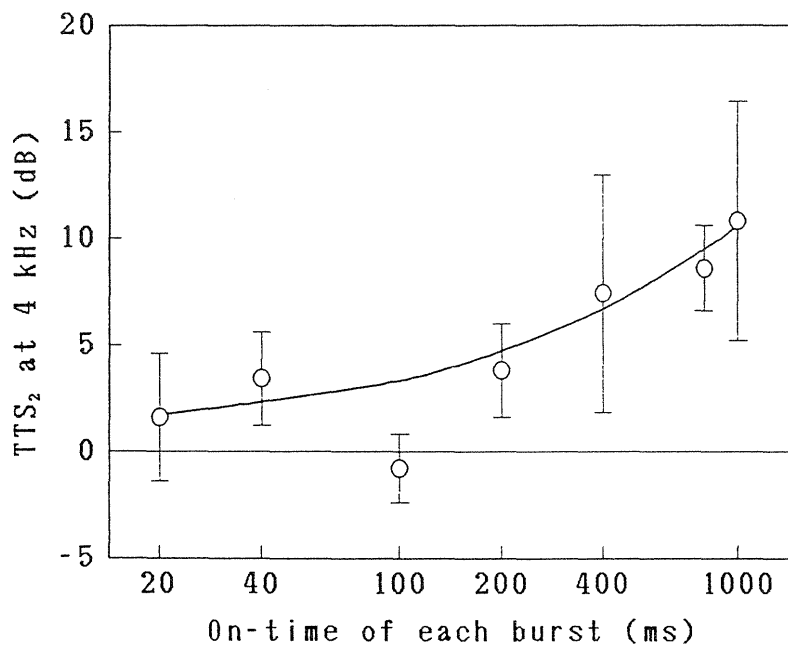


Fig. 5.23 TTS₂ at 4 kHz vs. on-time. Duration of exposure is 40 min. Circles indicate the means of seven subjects and vertical bars show their 95% confidence limits. The solid curve shows the calculation from the empirical equation derived in chapter 4.

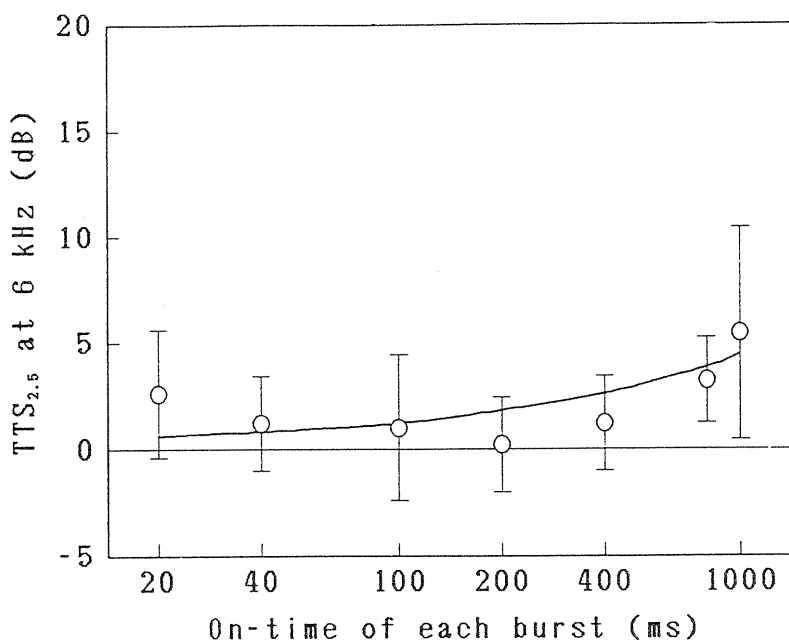


Fig. 5.24 TTS_{2.5} at 6 kHz vs. on-time. Duration of exposure is 10 min. Circles indicate the means of seven subjects and vertical bars show their 95% confidence limits. The solid curve shows the calculation from the empirical equation derived in chapter 4.

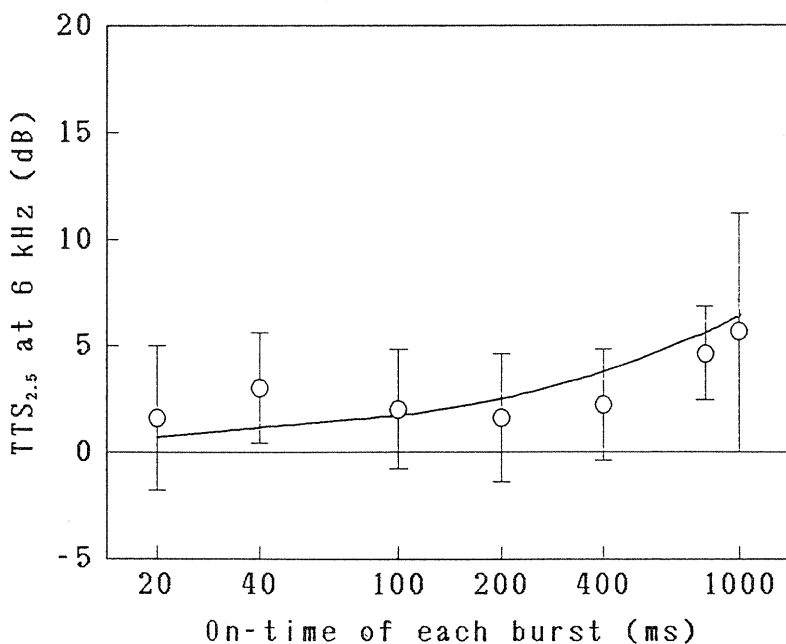


Fig. 5.25 TTS_{2.5} at 6 kHz vs. on-time. Duration of exposure is 20 min. Circles indicate the means of seven subjects and vertical bars show their 95% confidence limits. The solid curve shows the calculation from the empirical equation derived in chapter 4.

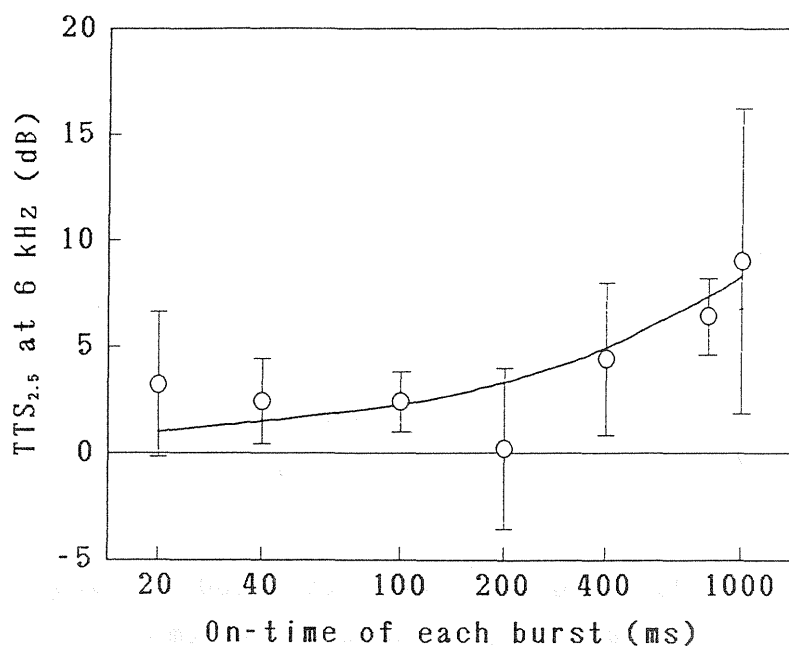


Fig. 5.26 $TTS_{2.5}$ at 6 kHz vs. on-time. Duration of exposure is 40 min. Circles indicate the means of seven subjects and vertical bars show their 95% confidence limits. The solid curve shows the calculation from the empirical equation derived in chapter 4.

Table 5.4 The values of $TTS_{1.5}$ at 3 kHz calculated from the empirical equations derived in chapter 4. TTS_1 means the value induced by intermittent noise exposure, and TTS_c means the value induced by continuous noise whose level is the same as the peak level of intermittent noise.

Duration (min)	On fraction	Peak level (dB SPL)	TTS_1 (dB)	TTS_c (dB)	TTS_1/TTS_c
10	0.025	114	0.29	11.38	0.025
	0.050	111	0.42	8.36	0.050
	0.100	108	0.61	6.14	0.099
	0.200	105	0.90	4.50	0.200
	0.400	102	1.32	3.31	0.399
	0.800	99	1.94	2.43	0.798
20	0.025	114	0.51	20.45	0.025
	0.050	111	0.75	15.02	0.050
	0.100	108	1.10	11.03	0.100
	0.200	105	1.62	8.09	0.200
	0.400	102	2.38	5.94	0.400
	0.800	99	3.49	4.36	0.800
40	0.025	114	0.87	34.81	0.025
	0.050	111	1.28	25.56	0.050
	0.100	108	1.88	18.76	0.100
	0.200	105	2.76	13.78	0.200
	0.400	102	4.05	10.11	0.401
	0.800	99	5.94	7.43	0.799

Table 5.5 The values of TTS_2 at 4 kHz calculated from the empirical equations derived in chapter 4. TTS_1 means the value induced by intermittent noise exposure, and TTS_c means the value induced by continuous noise whose level is the same as the peak level of intermittent noise.

Duration (min)	On frac- tion	Peak level (dB SPL)	TTS_1 (dB)	TTS_c (dB)	TTS_1/TTS_c
10	0.025	114	0.61	24.57	0.025
	0.050	111	0.87	17.46	0.050
	0.100	108	1.24	12.40	0.100
	0.200	105	1.76	8.81	0.200
	0.400	102	2.50	6.26	0.399
	0.800	99	3.56	4.45	0.800
20	0.025	114	1.04	41.70	0.025
	0.050	111	1.48	29.62	0.050
	0.100	108	2.10	21.04	0.100
	0.200	105	2.99	14.95	0.200
	0.400	102	4.25	10.62	0.400
	0.800	99	6.03	7.54	0.800
40	0.025	114	1.63	65.55	0.025
	0.050	111	2.33	46.56	0.050
	0.100	108	3.31	33.08	0.100
	0.200	105	4.70	23.50	0.200
	0.400	102	6.68	16.69	0.400
	0.800	99	9.48	11.86	0.799

Table 5.6 The values of $TTS_{2.5}$ at 6 kHz calculated from the empirical equations derived in chapter 4. TTS_1 means the value induced by intermittent noise exposure, and TTS_c means the value induced by continuous noise whose level is the same as the peak level of intermittent noise.

Duration (min)	On frac- tion	Peak level (dB SPL)	TTS_1 (dB)	TTS_c (dB)	TTS_1/TTS_c
10	0.025	114	0.53	21.47	0.025
	0.050	111	0.79	15.76	0.050
	0.100	108	1.17	11.75	0.099
	0.200	105	1.75	8.75	0.200
	0.400	102	2.61	6.52	0.399
	0.800	99	3.89	4.86	0.798
20	0.025	114	0.76	30.44	0.025
	0.050	111	1.13	22.69	0.050
	0.100	108	1.69	16.91	0.100
	0.200	105	2.52	12.60	0.200
	0.400	102	3.76	9.39	0.400
	0.800	99	5.60	7.00	0.800
40	0.025	114	1.00	39.95	0.025
	0.050	111	1.48	29.77	0.050
	0.100	108	2.22	22.19	0.100
	0.200	105	3.31	16.54	0.200
	0.400	102	4.93	12.33	0.400
	0.800	99	7.35	9.19	0.800

5.4 TTS の回復過程について

5.4.1 回復時間が短い場合

5.4.1.1 暴露実験の概要

ここで取り上げる実験は、山本ら⁷⁾のもので、 TTS_{τ} ($\tau=0.25\sim 8$)を TTS_0 に変換する図表を作成する目的で行われたものである。暴露騒音として音圧レベル 105 dB SPL の定常白色騒音をそれぞれ 0.5, 1, 2, 4, 8 min 暴露し、各条件について暴露終了後から 0.25, 0.5, 1, 1.5, 2, 4, 8 min の時点においてテスト周波数 4 kHz における TTS を測定したものである。被験者は男子学生 10 名であり、今回はその平均値について検討する。

5.4.1.2 実験結果と予測計算の結果

この実験の場合は、暴露ピークレベルが 105 dB SPL と一定しており、第4章で作成した実験式の暴露レベルの適用範囲を逸脱していると考えられる点、及び暴露時間がかなり短い点を勘案して、暴露時間のみを変数とする1次遅れ系の指数関数を TTS の増大の式とすることにした。まず、全てのデータを用いて、最小二乗法により次式を得た。

$$\begin{aligned}TTS_0(t) &= 75.3 \{1 - \exp(-t/8.51)\} \\TTS_{\tau}(t) &= TTS_0(t + \tau) - TTS_0(\tau)\end{aligned}\quad (5.5)$$

ただし、 t : 暴露時間 (min)

τ : 暴露終了後の休止時間 (min)

実験データと上式による計算結果を図示したものが Fig. 5.27 である。図中の実線が、式(5.5)による予測値を表しているが、暴露終了後の休止時間 τ が短い 0.25~0.5 min や長い 8 min の時点における適合度が良くない。これは暴露終了直後から 1 min 程度の間の TTS は、急速に回復すると言われており⁸⁾、そのために一つの実験式で全ての挙動を説明するのは不可能であると考えられる。そこで、 $\tau=0.25, 0.5$ min の実験データを除外して、式(5.5)の場合と同様な当てはめを行ったところ、次式を得た。

$$TTS_0(t) = 87.3 \{1 - \exp(-t/11.8)\} \quad (5.6)$$

式(5.6)による計算結果を Fig. 5.27 において点線で表示した。図より分かるように、点

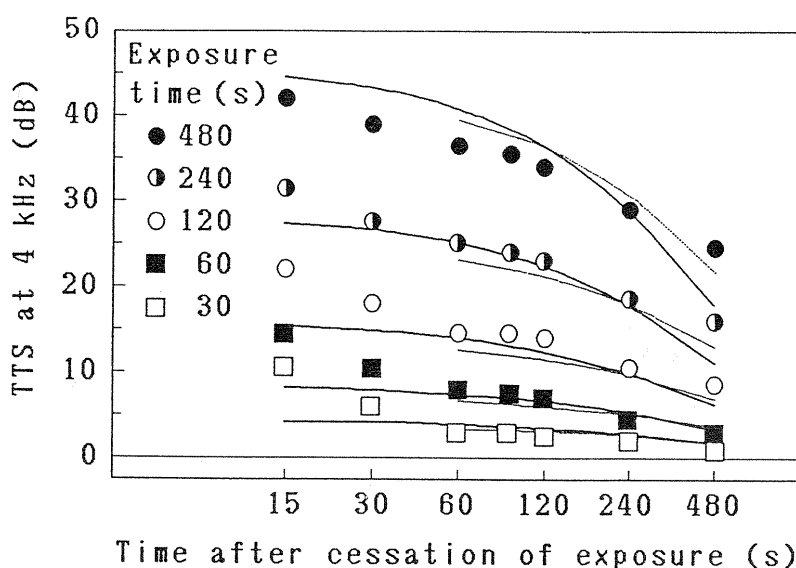


Fig. 5.27 Recovery of TTS at 4 kHz. Exposure noise is 105 dB SPL white noise. Parameters are durations of exposure. Solid curve shows calculation from Eq. (5.5), and dotted curve shows that from Eq. (5.6).

線で表示された式 (5.6) の方が, $\tau = 1 \sim 8$ min のデータに良く追従している。

ここで, 式 (5.5) を一般化すると次のようになる。

$$\begin{aligned}
 \text{TTS}_\tau(t) &= \text{TTS}_0(t + \tau) - \text{TTS}_0(\tau) \\
 &= K[1 - \exp\{-(t + \tau)/T\}] - K[1 - \exp(-\tau/T)] \\
 &= K[\exp(-\tau/T) - \exp\{-(t + \tau)/T\}] \\
 &= K[1 - \exp(-t/T)] \exp(-\tau/T) \\
 &= \text{TTS}_0(t) \exp(-\tau/T)
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

式 (5.7) は, TTS の増大過程を表す成分 $\text{TTS}_0(t)$ と回復過程を表す成分 $\exp(-\tau/T)$ の積で表されている。そこで回復過程については, 時定数 T の値を増大過程と異なる値を与えると, 予測結果がより実験データに近づく可能性がある。従って, TTS の増大過程の時定数と回復過程のそれとが異なるという仮定のもとに, 実験データに当てはめを行い次式を得た。

$$\text{TTS}_\tau(t) = 54.9[1 - \exp(-t/6.30)] \exp(-\tau/14.7) \tag{5.8}$$

ただし、式(5.6)と同様 $\tau=0.25, 0.5$ min のデータは除外している。式(5.6)による予測結果と比較して図示したものが Fig. 5.28 である。図中、実線が式(5.8)による予測値を、点線が式(5.6)によるそれを表している。図より分かるように式(5.8)による予測値の方が、より実験データに追随している。残差平方和($n=25$)で比較しても、式(5.8)が 22.28、式(5.6)が 72.52 となっており、前者の方が小さい。前者と後者では、式中の自由パラメータの数が異なっているので、第4章と同様に AIC の値で比較すると、式(4.4.3)より 78.07, 105.57 となり、やはり前者の方が小さく、実験データへの適合度は良い。従って、TTS の増大過程と回復過程とは、その時定数の値は異なっており、後者の方が前者に比べ2倍程度或はそれ以上大きくなると考えたほうが妥当であろう。この点に関しては、第1章 1.2.3 で紹介したように Mills *et al.*⁹⁾ が24時間騒音暴露実験のデータに同様な指数関数形を当てはめ、増大過程の時定数には 2.1 h を、回復過程のそれには 7.1 h という値を与えていることと同様な傾向にある。

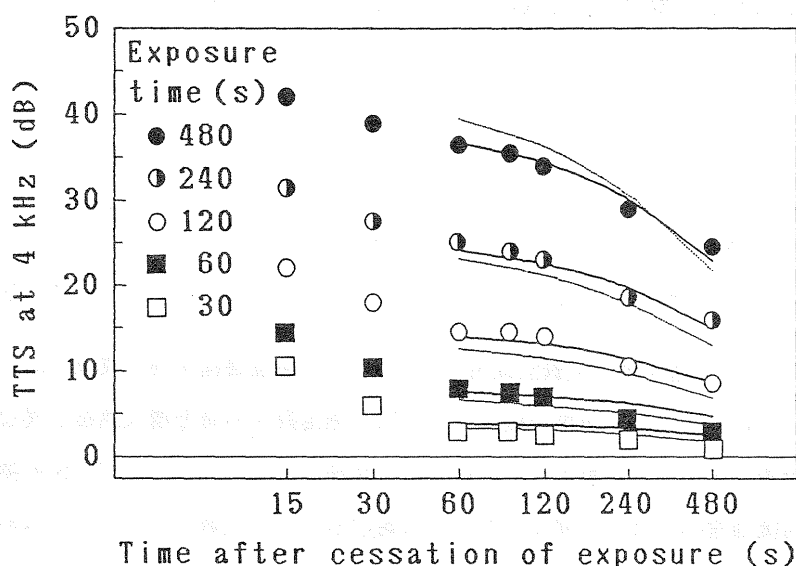


Fig. 5.28 Recovery of TTS at 4 kHz. Exposure noise is 105 dB SPL white noise. Parameters are durations of exposure. Solid curve shows calculation from Eq. (5.8), and dotted curve shows that from Eq. (5.6).

また、山本らが目的とした TTS_{τ} から TTS_2 への変換について考えるならば、回復過程の時定数 T_R とすると、

$$\begin{aligned} TTS_2 - TTS_{\tau} &= TTS_0 \exp(-2/T_R) - TTS_0 \exp(-\tau/T_R) \\ &= TTS_0 \exp(-\tau/T_R) [\exp\{-(\tau-2)/T_R\} - 1] \\ &= TTS_{\tau} [\exp\{-(\tau-2)/T_R\} - 1] \end{aligned} \quad (5.9)$$

となる。この式より TTS_{τ} から TTS_2 への変換量は、暴露騒音のレベルや暴露時間には関係なく、 TTS の大きさと回復時間 τ によって決定することが可能であることが分かる。つまり式(5.9)は、山本らが求めた変換図表を数式化したものに他ならない。

5.4.2 回復時間が長い場合

5.4.1 では、数分単位の比較的短時間の回復時間における実験データについて検討を加えた。ここでは、数時間単位のより長い回復時間における実験データを取り上げる。なお以下に述べる実験は、新幹線保線作業に伴って発生する強大騒音が、作業に従事する労働者の聴力に及ぼす影響を検討するために行った研究¹⁰⁾の一部である。

5.4.2.1 実験方法

被験者には、男子学生5名(年齢 21～24歳)を採用した。各被験者の聴力域値は、0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4, 6, 8 kHz の各テスト周波数において、ISO (1964)¹¹⁾ 基準の聴力レベルで 20 dB 以下である。

暴露音としては、新幹線保線作業のうち、道床つき固め作業に使用されていた大型機械(マルチプルタイタンバ、以下 MTT と略記する)の周辺で、タンピング・ハンマーの直前において調整を行う、通称“前さばき”と呼ばれる労働者の耳元付近で普通騒音計(JEIC, SLP-21)、テープレコーダ(NAGRA, IV-SJ)を用いて録音したテープを、実験室において編集・再生したものを採用した。録音時間は、約 10 min であったが、2 台のテープレコーダ(NAGRA, VI-SJ 及び TEAC, R-310)を用いて編集し、約 40 min の暴露が可能なテープを作製した。これを、第2章と同じ京都大学衛生工学教室に設置された防音無響室内において、テープレコーダ(TEAC, R-310)で再生し、イコライザ(General Radio, 1925)及び増幅器(SONY, TA-F4)を通して、録音時における実際の騒音の周波数特性が、可及的忠実に再現されるよう調整して、スピーカ(PIONEER, PAX A-25)から放射した。すなわち、

白色騒音を増幅器
に入力しておき、
そのスピーカから
の出力の 1/3 オク
ターブバンド分析
結果が、+3 dB/oct
の傾きになるよう
イコライザを調整
した。騒音暴露に
あたっては、被験
者は、片耳をスピー
カに向け、かつ
外耳道口の位置を
スピーカから 80
cm の距離になる
ように、椅子に着
席した。

従って、騒音の
諸特性を再現する
ための調整では、
モニタリングマイ
クロホンを用いて、被験
者を退去させた後
で、被験者の外耳
道口が占める位置
に設置した。

再生した暴露音
の 1/3 オクターブ
バンド分析結果を

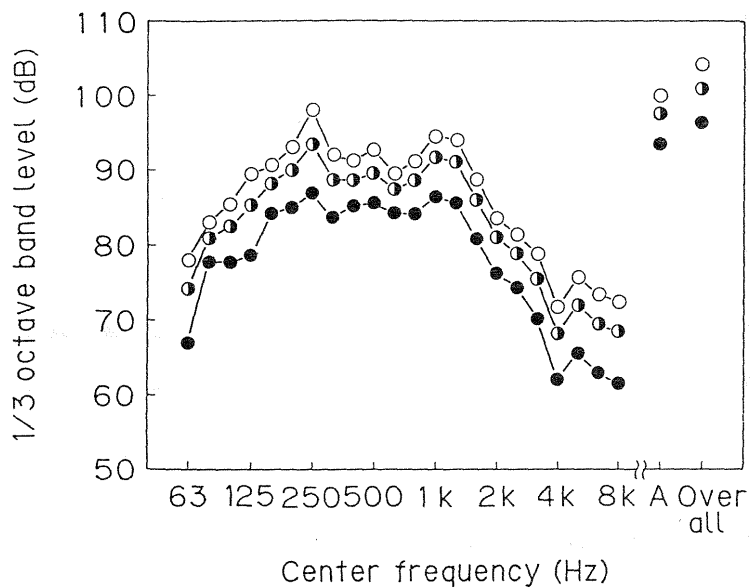


Fig. 5.29 One third octave band analysis of exposure noise recorded near the worker who adjusted the machine in front of the hammers of MTT. Open circles indicate L_5 , semi-solid circles indicate L_{eq} , and solid circles indicate L_{95} . Capital A on the abscissa means A-weighted sound pressure level.

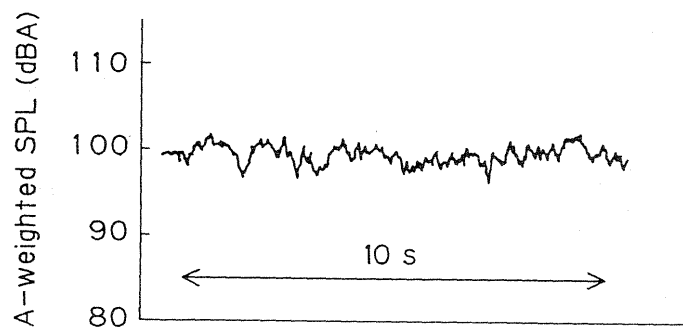


Fig. 5.30 An example of level fluctuations of the exposure noise.

Fig. 5.29 に示した。暴露音は Fig. 5.30 に示すように変動騒音であるので、90%レン

ジの上端値 L_5 ，下端値 L_{95} ，等価騒音レベル L_{eq} で表示している。各統計量は，動特性 fast，サンプリング間隔 100 ms，サンプリング個数 2500，平均化時間 250 s の条件の下で算出した。また，実際の MTT 稼働時間は，70～90 min であるが，被験者の聴力に対する危険度を考慮して，暴露時間は 30 min とした。また，MTT 作業は深夜に実施されるので，暴露実験も午前 0 時頃から 1 時頃にかけて行うようにした。

域値の測定は，同防音無響室内において，自記オージオメータ（永島医科器械，A60-C）を用いて行った。測定条件は，固定周波数・断続音（断続の周波数 2 Hz）・レベルの減衰速度 2 dB/s に設定し，上昇法・下降法の平均値（鋸歯状曲線の上下端値の平均値）を域値とした。なお，レシーバの出力音圧は，人工耳（B & K，4153）及び精密騒音計（B & K，2203）を用いて監視した。

暴露に先立って，両耳の 0.25～8 kHz の域値を測定し，さらに，暴露耳の 0.5，1，2，3，4，6，8 kHz における域値を，各 2 回測定して，その 2 回の平均値を暴露前域値とした。暴露後の域値測定は，Fig. 5.31 に示すように暴露終了後 1 min 15 s，9 min 45 s，29 min 45 s，59 min 45 s，119 min 45 s から開始し，さらには，約 12 時間後にも行った。測定周波数は，1，2，4，6，8，0.5 kHz の順序とし，それぞれ 30 s ずつ行った。今回測定した TTS は，テスト周波数 1 kHz については，それぞれ， $TTS_{1.5}$ ， TTS_{10} ， TTS_{30} ， TTS_{60} ， TTS_{120} ， TTS_{720} と表記される。

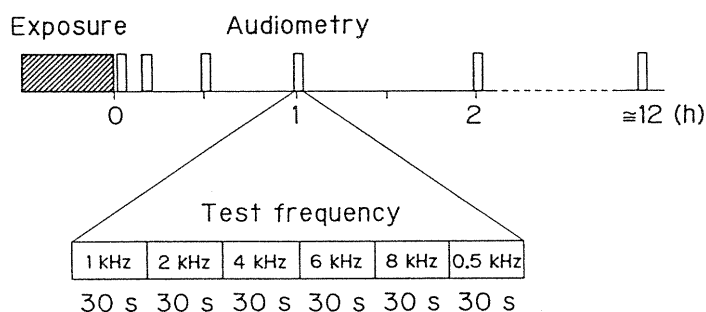


Fig. 5.31 Schematic schedule of noise exposure and audiometry.

Table 5.7 TTSs obtained from the experiment.

Time after cessation of exposure (min)	Mean (\bar{x}) and standard deviation (σ_n) of NITTS (dB)											
	0.5kHz		1 kHz		2 kHz		4 kHz		6 kHz		8 kHz	
	\bar{x}	σ_n	\bar{x}	σ_n	\bar{x}	σ_n	\bar{x}	σ_n	\bar{x}	σ_n	\bar{x}	σ_n
1.5— 4	2.7	(3.7)	2.1	(6.6)	12.2	(5.0)**	16.5	(3.0)**	10.3	(4.3)**	11.6	(7.3)*
10— 12.5	1.8	(2.5)	1.7	(4.0)	8.8	(3.6)**	12.6	(2.6)**	7.6	(6.4)*	6.5	(5.8)*
30— 32.5	2.6	(4.1)	0.1	(3.4)	6.1	(2.4)**	8.7	(3.5)**	7.0	(7.6)	5.1	(7.7)
60— 62.5	1.7	(2.7)	-0.2	(4.1)	3.5	(2.2)*	5.0	(1.5)**	5.5	(5.9)	4.5	(3.9)*
120—122.5	1.1	(2.7)	-0.8	(2.6)	2.9	(1.9)*	6.5	(3.2)**	3.1	(3.0)	2.9	(5.3)
720	-2.4	(3.7)	-2.6	(3.4)	-0.7	(1.2)	-0.4	(3.0)	1.2	(2.4)	2.1	(4.1)

*: Significance level; $\alpha=0.05$, **: Significance level; $\alpha=0.01$

5.4.2.2 実験結果と予測計算の結果

騒音暴露によって得られた TTS の実測値を Table 5.7 に示した。表では、暴露終了後の時間毎に、5名の平均値と標準偏差を掲載した。また、暴露前の聴力域値より有意に上昇した場合(片側検定)については、それぞれ*(有意水準5%)、**(有意水準1%)を付して表示した。また、Fig. 5.32~5.35 に有意な域値上昇が観測されることが多かったテスト周波数 2, 4, 6, 8 kHz について、実測値を5名の平均値及び95%信頼限界で表示し、第4章で作成した実験式を単位階段関数法を適用して予測計算した結果を、実線で図示した。

図より分かるように、5.2 あるいは 5.3 で行った予測計算に比べて、今回は、実験データに対する適合度が良くない場合が多い。

まず実測値について、式(5.7)と同様な関数形を当てはめた場合の、回復の時定数は、2, 4, 6, 8 kHz についてそれぞれ、54.3, 76.4, 103.5, 68.4 となった。これに対して、予測計算値に当てはめた場合には、それぞれ 21.7, 41.6, 18.8, 21.6 であり、この値は第4章 Table 4.11 における T_1 の値よりもやや大きくなっている。やはり、今回も実測値の方が、時定数は2倍あるいはそれ以上大きくなっている。従って、この場合も TTS の回復過程については、増大過程よりも大きな時定数を与えた方が、より実験データに良く追随する可能性があると言える。

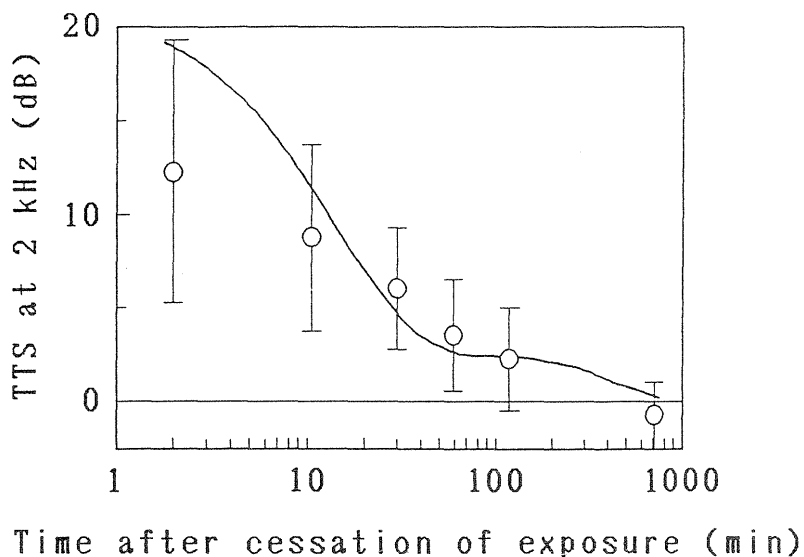


Fig. 5.32 Recovery of TTS at 2 kHz. Circles indicate the means of five subjects and vertical bars show their 95% confidence limits. The solid curve shows the calculation from the empirical equation derived in chapter 4.

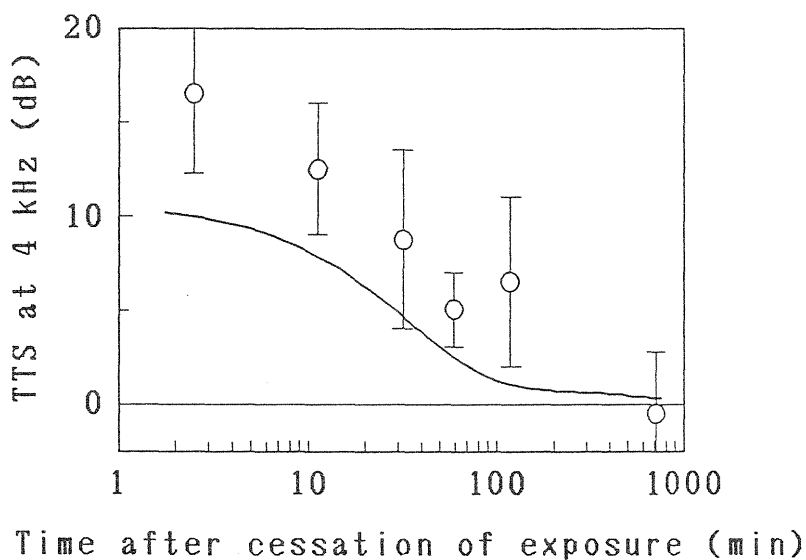


Fig. 5.33 Recovery of TTS at 4 kHz. Circles indicate the means of five subjects and vertical bars show their 95% confidence limits. The solid curve shows the calculation from the empirical equation derived in chapter 4.

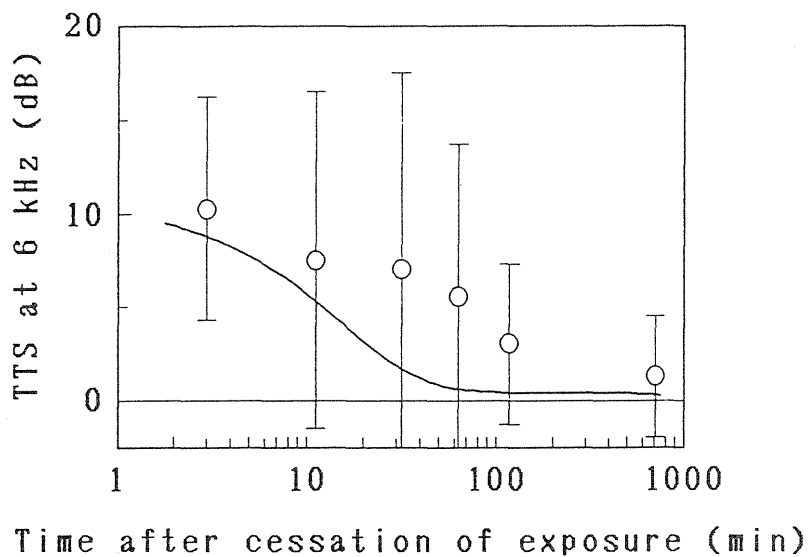


Fig. 5.34 Recovery of TTS at 6 kHz. Circles indicate the means of five subjects and vertical bars show their 95% confidence limits. The solid curve shows the calculation from the empirical equation derived in chapter 4.

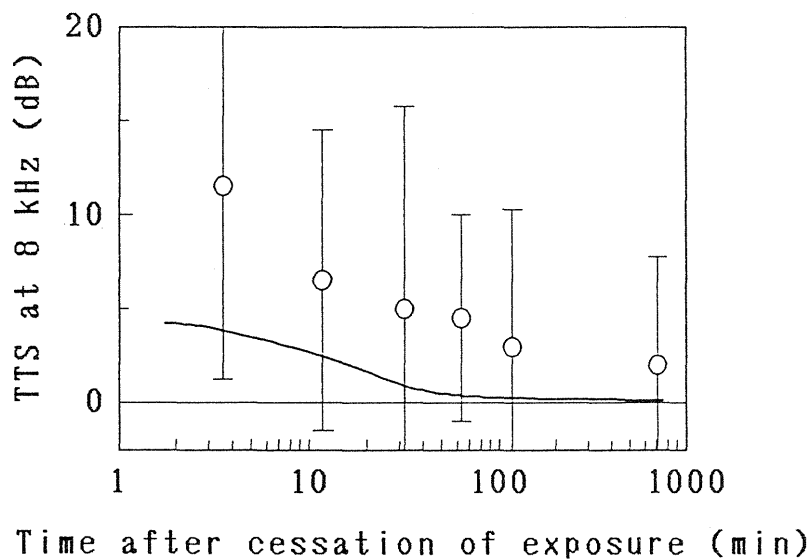


Fig. 5.35 Recovery of TTS at 8 kHz. Circles indicate the means of five subjects and vertical bars show their 95% confidence limits. The solid curve shows the calculation from the empirical equation derived in chapter 4.

5.5 結論

第4章で作成した TTS の増大の式と単位階段関数法を用いて、変動騒音暴露による TTS の予測計算を行い、推定方法としての妥当性を検討した。さらに、回復過程まで含んだ暴露実験データについても予測計算を行い、増大の式によって回復過程まで推定しうるかどうかの検討を行った。その結果、以下の結論を得た。

(1) on-time, off-time が、それぞれ 1 min ずつである断続騒音暴露の場合、on-time の間に暴露レベルが、85 dB SPL から 100 dB SPL の範囲内で変動しても、第4章で作成した TTS の増大の式と単位階段関数法により推定可能である。また、増大の式として暴露時間の関数に対数式を用いるよりも、1次遅れ系の指数関数式或はそれを含んでいる第4章で作成した TTS の増大の式による方が、予測精度は良い。今回取り上げた断続暴露に対する on fraction rule の検証では、実験結果及び予測計算結果のいずれにおいても成立することが確認された。

(2) duty cycle が 1 s と短くまた、on fraction も 0.025~0.8 の範囲にあるような騒音暴露実験のデータについても、第4章で作成した TTS の増大の式と単位階段関数法により推定可能であることが明らかとなった。また、等エネルギー仮説は、TTS の場合には成立しにくいことが、実験データ及びばかりでなく、その予測計算結果からも判明した。以上のことから、TTS の増大の式と単位階段関数法を用いた推定方法は、任意の変動騒音暴露に適用可能な汎用性の高い方法であると言える。

(3) 暴露時間よりも回復時間の方が長い場合の実験データについては、TTS の回復過程に、増大過程よりも2倍或はそれ以上の時定数をもつ回復の式を採用した方が、予測精度は高くなることが判明した。しかし現時点では、第4章で作成した増大の式と同程度まで精密な回復の式を作成するだけの、実験データは蓄積されていない。また増大の式の符号を逆転して回復の式としても、予測精度は極端に悪化することはないので、当面は増大の式を代用してもよいものと思われる。

参考文献

- 1) K. Takagi, T. Yamamoto and H. Shoji, "Permissible noise criteria for hearing conservation," 7th Int. Cong. Acoust. Budapest, 25S2, 777-780 (1970).
- 2) T. Yamamoto, H. Shoji and K. Takagi, "Prediction of temporary threshold shift following exposure to noise having arbitrary spectrum and temporal characteristics," 6th Int. Cong. Acoust. Tokyo, A-2-8, A-9-A-12 (1968).
- 3) 中本 守, "変動騒音による TTS の研究," 京都大学工学部衛生工学科特別研究 (1975).
- 4) W.D. Ward, A. Glorig and D.L. Sklar, "Dependence of temporary threshold shift at 4kc on intensity and time," J. Acoust. Soc. Am. 30, 944-954 (1959).
- 5) 山本剛夫, 高木興一, 平松幸三, 増田 隆, "暴露エネルギーの等しい断続騒音による一過性域値上昇," 産業医学, 27, 158-165 (1985).
- 6) 平松幸三, 騒音の評価法, 日本建築学会編 (彰国社, 東京, 1981), p.205.
- 7) 山本剛夫, 高木興一, 庄司 光, 米田明彦, "TTS_t から TTS₂ への変換," 産業医学, 11, 445-448 (1969).
- 8) W.D. Ward, A. Glorig and D.L. Sklar, "Temporary threshold shift from octave-band noise: applications to damage-risk criteria," J. Acoust. Soc. Am., 31, 522-528 (1959).
- 9) J.H. Mills, R.M. Gilbert and W.Y. Adkins, "Temporary threshold shifts in humans exposed to octave bands of noise for 16 to 24 hours," J. Acoust. Soc. Am. 65, 1238-1248 (1979).
- 10) 伊藤昭好, 末田一秀, 平松幸三, 高木興一, 山本剛夫, "新幹線保線作業に伴う強大騒音の聴力影響について," 労働科学, 62, 451-462 (1986).
- 11) ISO, "Standard reference zero for the calibration of pure-tone audiometers," ISO Recommendation R389 (1964).

第6章 環境騒音暴露によるTTS 推定の実験的研究

6.1 はじめに

近年、航空機騒音をはじめ、道路交通騒音などの強大な環境騒音の暴露により、住民の聴力に対するその影響が懸念されている。騒音の有害性を評価する重要な指標としては、本研究で取り上げてきたTTSが挙げられる。具体的には、問題となる環境騒音を録音したものを、実験室内で被験者に再生暴露し、そのTTSを測定することにより、当該環境騒音の有害性を論ずるものである^{1)~4)}。

道路交通騒音の暴露によって、TTSが生じることは、既に報告されている^{3), 4)}。本章では6.2において、5名の被験者に対して、道路交通騒音の模擬音を、レベルを数段階に変えて暴露し、どの程度の暴露レベルからTTSが生じるかを検討した。さらに、第4章で作成した低レベル長時間騒音暴露に適用可能なTTSの増大の式及び単位階段関数法⁵⁾を用いて、TTSの予測値を算出し、実測値との比較を行い、当該手法によって、道路交通騒音暴露による聴力影響評価が可能であるかについても検討した。

さらに6.3では、道路交通騒音の実測データの一例を取り上げて、同様に当該手法を適用して、24時間にわたるTTSの変動の予測計算を試みた。

6.2 模擬道路交通騒音暴露によるTTSの実験的研究

6.2.1 実験方法

6.2.1.1 被験者

0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4, 6, 8 kHzの各テスト周波数における両耳の聴力レベル(hearing level)が20 dB以下である男子学生10名(年齢20~23歳)に対し、あらかじめ、90 dB SPLの広帯域定常騒音を、無響室内において30 min暴露し、テスト周波数4, 5, 6 kHzにおけるTTSを測定した。暴露は、日を変えて3回繰り返し、上記10名の中からTTSの成績の再現性の良い上位5名を被験者として採用した。

6.2.1.2 暴露方法

騒音暴露は、大阪府公害監視センターに設置された残響室内で、5名の被験者に対し同時に行った。室内には拡散板が吊されており、室内空間の体積は 101 m^3 、拡散板を含む壁面の表面積は 175 m^2 である。

暴露騒音は、以下の手順によって作製した。まず、ランダム雑音発生器(B & K, 1024)より発生させた白色騒音を、イコライザ(General Radio, 1925)に通し、Fig. 6.1 に示すような周波数構成をもつ広帯域騒音を作製した。図には、残響室内 24 地点における実測値の平均値及び標準偏差を示した。この周波数構成は、日本音響学会の報告書⁶⁾に示されたものを参考にして決定したが、実際の暴露音では、報告書に掲載されているものに比べ、やや低周波数の成分が卓越したものとなった。

暴露音のレベル変動は、1車線等間隔モデル⁷⁾に基づいた時間変動を、騒音レベル制御装置(森技研, SG-112)を用いて実現した。このモデルに従うレベル変動は、次式で表される。

$$SPL = PWL + 10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{2dS} \frac{\sinh(2\pi d/S)}{\cosh(2\pi d/S) - \cos(2\pi x/S)} \right\} \quad (6.1)$$

ただし、PWL
はパワーレベル、
Fig. 6.2 に図
示したようにS
は車頭間隔、d
は車線から観測
点Pまでの距離、
xは観測点Pか
ら車線に下ろし
た垂線の足Oと、
最初の車との距
離である。ここ

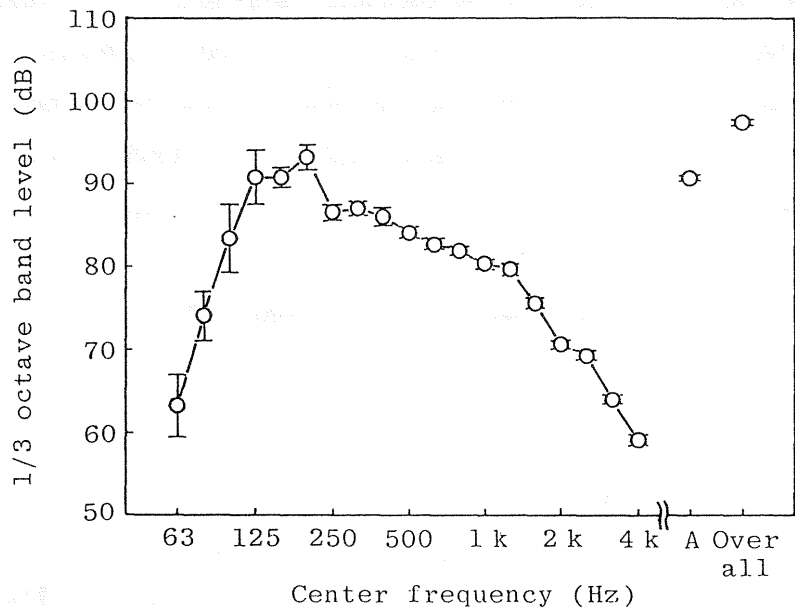
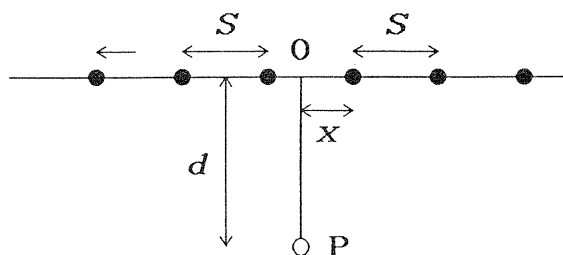


Fig. 6.1 One third octave band analysis of the exposure noise. Each point shows the mean over 24 measuring points in the room. Vertical bars show standard deviations.

想定した走行条件は、交通量
毎時 2500 台、車速 50 km/h,
 $S=20$ m, $d=2.35$ m である。
実際の騒音暴露では、騒音レ
ベル制御装置の出力を、一旦、



2 台のテープレコーダ (NAGRA, Fig. 6.2 Equally spaced vehicles model. Each
IV-S 及び IV-SJ) を用いて 約 vehicle is assumed to be a point source with the
30 min 録音し、それらを所 same acoustic power.
定の暴露時間まで交互に再生

した。テープレコーダの出力は、増幅器 (TEAC, AE-200) で所定のレベルに調整した後、均
一な騒音分布が得られるように配置された 4 個の無指向性スピーカ (Victor, GB-10) より
暴露室内に放射した。暴露騒音のレベル変動を室内で実測した例を Fig. 6.3 に示す。図
より分かるように、1.44 s を周期とする変動騒音である。

暴露レベルは、等価騒音レベル L_{eq} で、82, 85, 88, 91 dBA となる 4 条件とした。な
お、 L_{eq} の算出条件は、動特性 fast, サンプリング間隔 100 ms, サンプリング個数 200,
平均化時間 20 s として、レベルを監視した。

暴露時間は 8 時間で、Fig. 6.4 に示すように、暴露開始後 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7,
8 時間の時点で、それぞれ域値の測定を行った。域値の測定に伴う暴露の中断時間は、1
回につき 5 min または 10 min で、合計 45 min である。この中断時間は、暴露時間には
算入していない。

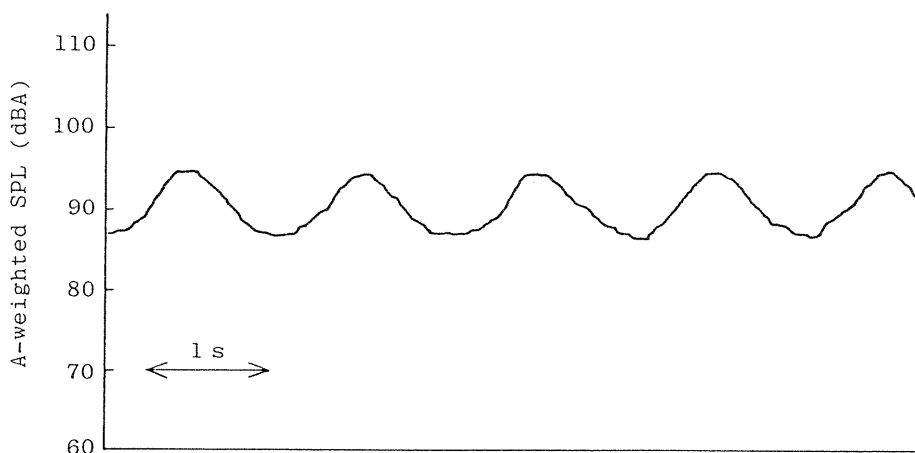


Fig. 6.3 An example of level fluctuations of the exposure noise.

被験者は、暴露開始前の域値を測定した後、各人 5 min ずつずらして残響室に入れ、騒音に暴露した。室内では、リクライニングチェアなどに腰掛けさせ、楽な姿勢をとらせた。Fig. 6.1 における暴露レベルの場所的変動の大きさから分かるように、室内の音場は、ほぼ均一とみなしうるが、念のため被験者に時々その位置を移動させた。被験者の摂取するものは弁当、茶菓をはじめ日常飲食するものであり、喫煙と飲酒は禁止した。

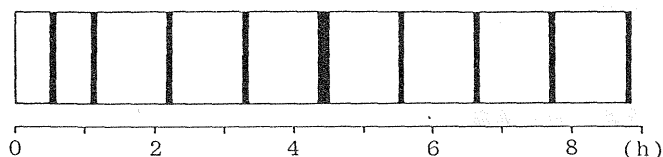


Fig. 6.4 Schematic schedule of noise exposure. Open area represents noise exposure, and solid area represents 5-min-off-time or 10-min-off-time for audiometry. Total exposure time is 8 h. Sum of the off time for audiometry is 45 min.

6.2.1.3 域値の測定

域値の測定は、残響室に隣接した無響室内において自記オーディオメータ(永島医科器械, A 60-C)を用い、テスト周波数固定・断続音(断続の周波数 2 Hz)・レベルの変化速度 2 dB/s の条件に設定して行い、上昇法・下降法の平均値(鋸歯状曲線の上下端値の平均値)を域値とした。

レシーバ(Telephonics, TDH-39, MX41/AR クッション付)の出力音圧は、人工耳(B & K, 4153)及び精密騒音計(B & K, 2203)を用いて校正した。

暴露実験開始前に、まず右耳のテスト周波数 0.5, 1, 2, 4, 6, 8 kHz の域値を測定し、さらに 2, 4, 6 kHz について、それぞれ 3 回ずつ測定し、その 3 回の平均値を暴露前域値とした。暴露中は Fig. 6.5 に示すように、暴露中断 30 s 後から、テスト周波数 2, 4, 6 kHz の順にそれ

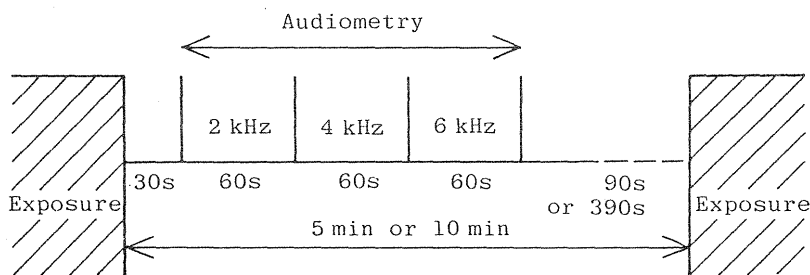


Fig. 6.5 Schematic schedule for audiometry.

ぞれ 60 s ずつ域値の測定を行った。暴露終了後 τ min の時点における TTS を TTS_{τ} と記す慣例に従えば、各々 TTS_1 , TTS_2 , TTS_3 を測定したことになる。

6.2.2 実験結果

各テスト周波数における5名の TTS の平均値(以下 TTS は、特に断わらない限り、5名の平均値をさす)の時間的変動を Fig. 6.6~6.8 に示した。Fig. 6.6 の暴露レベル $L_{eq} = 82$ dBA のデータ群において、0.5 及び 1 時間のデータが記載されていないのは、欠測が生じたためである。

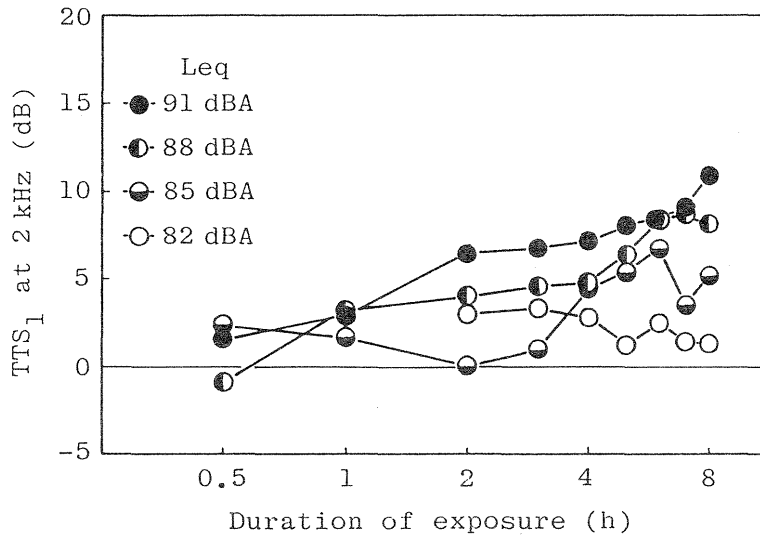


Fig. 6.6 Growth of TTS_1 at 2 kHz. TTS_s are the mean values over five subjects.

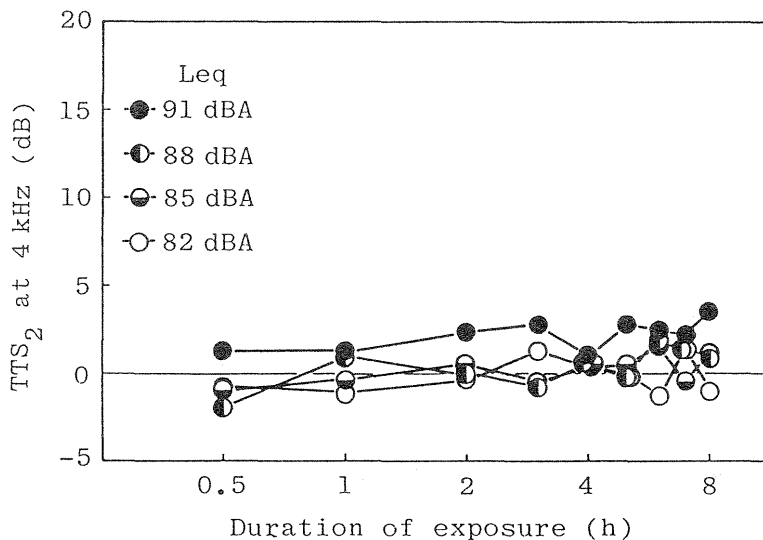


Fig. 6.7 Growth of TTS_2 at 4 kHz. TTS_s are the mean values over five subjects.

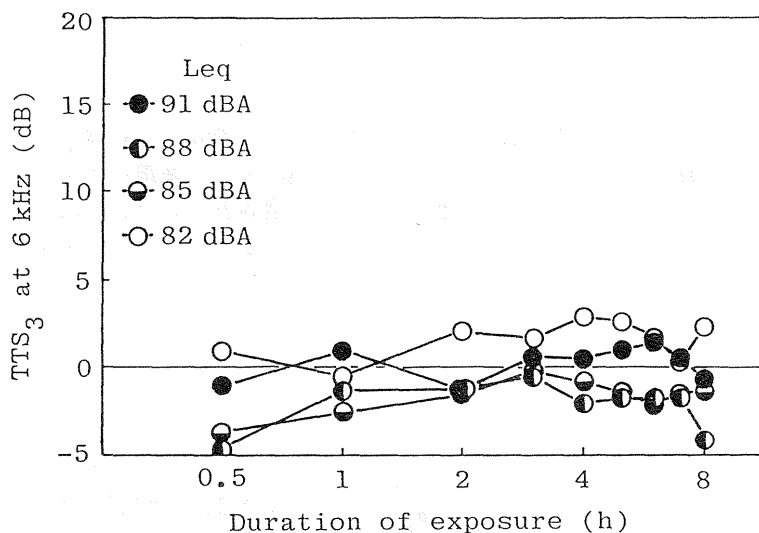


Fig. 6.8 Growth of TTS₃ at 6 kHz. TTSs are the mean values over five subjects.

これらの成績から、TTSの上昇傾向の有無を検討するために、各被験者及び5名の平均値に次式のような TTS の増大の式をあてはめた場合の相関係数の検定を行った。

$$TTS = a \log_{10} t + b \quad (6.2)$$

ただし、 t : 暴露時間(min)。

a, b : 定数。

検定結果を Table 6.1 に示す。表中、相関係数 r 及び回帰係数 a を掲載し、有意な正の相関が認められた場合(片側検定)に、相関係数の右肩に * (有意水準5%), ** (有意水準1%)をそれぞれ付して表示した。表より分かるように、今回の騒音暴露によって、個人毎の域値について見た場合、テスト周波数 2 kHz の TTS では、暴露レベル $L_{eq} = 85$ dBA 以上で、4 kHz では、 $L_{eq} = 88$ dBA 以上で複数の被験者に上昇傾向が認められる。5名の平均値に上昇傾向が認められるのは、両者とも $L_{eq} = 85$ dBA 以上からである。テスト周波数 6 kHz では、暴露レベルが上昇しても TTS は増大していない。

なお参考のため、各被験者の暴露実験中の聴力レベルの値を付録に示した (Table A. 23~A. 27)

Table 6.1 Relation between TTS and logarithm of exposure time. Values are correlation coefficients (r) and regression coefficient (a) for Eq. (6.2).

L_{eq}	82 dBA		85 dBA		88 dBA		91 dBA	
	r	a	r	a	r	a	r	a
Test frequency : 2 kHz								
Subject A	-0.272	-0.045	0.807**	0.068	0.869**	0.052	0.944**	0.063
B	0.176	0.024	0.665*	0.106	0.524	0.145	0.884**	0.102
C	-0.421	-0.033	-0.108	-0.031	0.724*	0.079	0.887**	0.106
D	-0.392	-0.037	0.218	0.039	0.843**	0.117	0.532	0.084
E	-0.472	-0.036	0.154	0.010	0.873**	0.110	0.484	0.091
Mean	0.471	0.157	0.621*	0.114	0.955**	0.127	0.978**	0.136
Test frequency : 4 kHz								
Subject A	-0.006	-0.001	-0.099	-0.025	0.425	0.083	0.092	0.019
B	-0.019	-0.004	0.792**	0.091	0.702*	0.139	0.530	0.087
C	0.289	0.054	-0.532	-0.198	0.452	0.093	0.778**	0.146
D	0.568	0.107	0.393	0.108	0.930*	0.294	0.660*	0.224
E	-0.333	-0.100	0.059	0.016	-0.314	-0.069	-0.685	-0.147
Mean	0.275	0.114	0.659*	0.322	0.665*	0.233	0.644*	0.316
Test frequency : 6 kHz								
Subject A	0.241	0.050	0.399	0.107	0.449	0.125	0.215	0.042
B	-0.204	-0.029	0.514	0.086	-0.128	-0.019	0.210	0.037
C	0.792**	0.089	0.583*	0.114	0.333	0.034	-0.054	-0.015
D	-0.278	-0.034	-0.199	-0.065	-0.434	-0.060	0.061	0.014
E	0.366	0.067	0.289	0.067	0.565	0.110	0.294	0.046
Mean	0.472	0.169	0.660*	0.265	0.226	0.068	0.362	0.155

* : Significance level; $\alpha=0.05$, ** : Significance level; $\alpha=0.01$

6.2.3 考察

今回採用したテスト周波数について、山本・高木らの従来の TTS の増大の式⁸⁾を、以下に示す。

テスト周波数

$$2 \text{ kHz: } \text{TTS}_2 = 0.25(S-19.3) \log_{10} t + 0.77S - 51.0 \quad (6.3)$$

$$4 \text{ kHz: } \text{TTS}_2 = 1.36(S-41.9) \log_{10} t - 0.45S + 18.7 \quad (6.4)$$

$$6 \text{ kHz: } \text{TTS}_2 = 0.88(S-39.1) \log_{10} t + 0.33S - 17.6 \quad (6.5)$$

これに対して、第4章で作成した実験式を、以下に示す。

テスト周波数

$$2 \text{ kHz: } \text{TTS}_0 = 0.063 \exp(0.102 S) \frac{1 - \exp(-t/13.4)}{1 + 1.61 \exp(-t/179.9)} \quad (6.6)$$

$$4 \text{ kHz: } \text{TTS}_0 = 0.106 \exp(0.114 S) \frac{1 - \exp(-t/31.8)}{1 + 1.04 \exp(-t/337.6)} \quad (6.7)$$

$$6 \text{ kHz: } \text{TTS}_0 = 0.261 \exp(0.098 S) \frac{1 - \exp(-t/14.8)}{1 + 1.07 \exp(-t/412.0)} \quad (6.8)$$

以上の式を、今回の騒音暴露に当てはめて数値計算を行い、実験成績と対比して図示したものが、Fig. 6.9 及び Fig. 6.10 である。数値計算のためのレベル変動近似の最小時間刻みは1周期の 1/10 つまり、144 ms とした。

Fig. 6.9 は、暴露レベル $L_{eq} = 91 \text{ dBA}$ の場合について、テスト周波数 2 kHz の TTS の増大を示したものである。図中、黒丸は5名の平均値を表しており、95%信頼限界も併せて表示している。実線が、第4章で作成した実験式(6.7)による予測値、破線が従来の式(6.3)によるそれを示している。一見して、従来の式による予測値に比べ、新しい式によるその方が実験データに良く追従することが分かる。従来の式によると、TTS の値を実測値よりかなり過大に算出するが、これは式(6.3)中の $(S-19.3)$ における定数の値が他のテスト周波数に比べて、極端に小さな値であることが原因となっている。すなわち、暴露レベルの変動を単位階段関数に近似して、予測計算を行う際に、式(6.3)の第2項以降の部分 $0.77S - 51.0$ は、加減の操作で相殺され、第1項のみ加算されていくため、 $(S-19.3)$ 内の定数が小さな 2 kHz については、計算値が大きくなるのである。

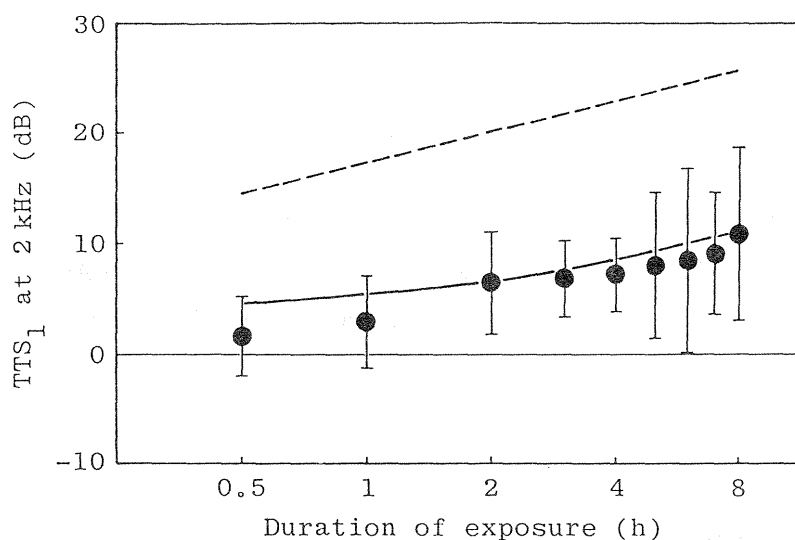


Fig. 6.9 Growth of TTS_1 at 2 kHz. Exposure level is 91 dBA expressed as $\angle eq$. Circles indicate the means of five subjects and vertical bars show their 95% confidence limits. The broken curve shows the calculation from Eq. (6.3), and the solid curve shows that from Eq. (6.6).

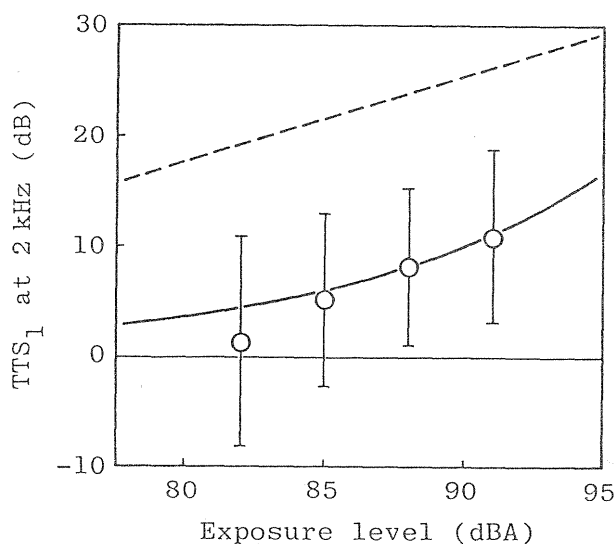


Fig. 6.10 The relation between TTS_1 at 2 kHz after 8 h exposure to noise and exposure level expressed as $\angle eq$. Circles indicate the means of five subjects and vertical bars show their 95% confidence limits. The broken curve shows the calculation from Eq. (6.3), and the solid curve shows that from Eq. (6.6).

この値が大きな 4 kHz 及び 6 kHz の場合は、今回の騒音暴露条件に、従来の式をあてはめて算出した TTS はいずれも 0 dB であった。なお、 TTS の臨界帯域⁹⁾ の中心周波数におけるスペクトルレベル S は、テスト周波数 2 kHz に対する中心周波数 1400 Hz に

おけるバンドレベルを Fig. 6.1 より読み取って算出した。他のテスト周波数についても、この方法に準じて行った。また従来の式では、2 min より休止時間の短い TTS の算出に際しては難点があるので、TTS₄ を計算してから、変換図表¹⁰⁾を用いて TTS₁ に変換する方法を用いた。

Fig. 6.10 は、横軸に暴露レベルをとり、縦軸に8時間暴露後のテスト周波数 2 kHz の TTS₁ をとって表示したものである。図中、白丸は5名の平均値を、縦線は 95 %信頼限界を示している。Fig. 6.9 と同様に、実線が新しい実験式による予測値を、破線が従来の式によるそれを示している。この図においても、新しい式による予測値が実験データに良く追随している。このことは新しい式が、低レベルとされる範囲にまで、妥当な量—効果関係(dose-effect relationship)を表現することが可能であることを示唆するものである。また、従来の式による予測結果は、Fig. 6.9 と同様に過大評価を与えているが、これは前述した理由によるものである。

なお、テスト周波数 4 kHz 及び 6 kHz については高い暴露レベルにおいても顕著な TTS の増大が認められなかったため、ここでは図示しなかった。従来の式による予測値は、前述したように、今回の暴露レベルの範囲ではいずれも 0 dB であり、これに対して新しい式の場合では、 $L_{eq} = 91$ dBA、8時間暴露後の 4 kHz における TTS₂ は 5.00 dB(実測値は 3.46 dB)、6 kHz における TTS₃ は 3.21 dB(実測値は -0.70 dB)であった。

以上の結果から、第4章で作成した低レベル長時間騒音暴露にまで適用可能な TTS の増大の新しい式を用いることによって、道路交通騒音のような環境騒音暴露による聴力影響評価が可能となると思われる。

6.3 実際の道路交通騒音のデータに基づいた TTS の予測例

6.3.1 道路交通騒音測定データの概要

TTS の予測計算を行うために、入力データとして、大阪府池田市北豊島中学校の南西角の交差点の直近で測定された騒音データを採用した。現場は、南北に通じる2車線道路と北西から南東に通じる2車線道路が交差しており、さらに後者の上を中国自動車道が高架となって通じている。騒音測定は、1987年12月8日 14時から 24時間にわたって行った。このうち12月8日 10時頃から翌日6時 30分頃までは、高架上で工事が行われ、交通が遮断されたため、その間は翌週12月14日に同時刻帯において同様な

測定を行い、その測定データをもって代替した。

測定は、普通騒音計よりの出力を デジタルオーディオテープレコーダに録音しておき、後日それを再生して、実時間 1/3 オクターブバンド分析器にて、2 s 間隔でサンプリングして測定値とした。つまり1つの 1/3 オクターブバンドについて、24 時間分 43,200 個のデータが存在する。

2 s 間隔のデータに基づいて算出した平均化時間 10 min の場合の等価騒音レベル $L_{eq,10min}$ の変動を Fig. 6.11 に図示した。また平均化時間を 24 時間とした $L_{eq,24h}$ は、74.9 dBA であり、夜間（22 時～7 時）の騒音のエネルギーを昼間に比べて 10 倍の重みづけをした L_{dn} (day-night sound level) は 78.0 dBA となった。

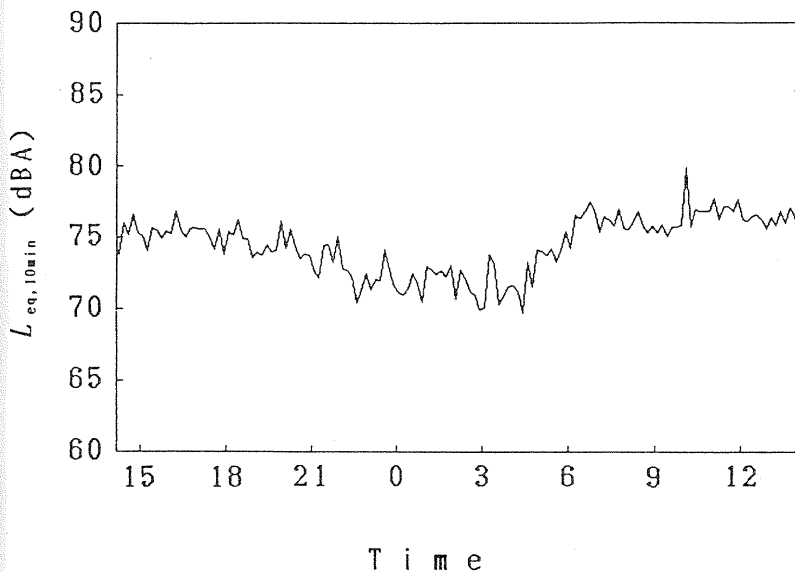


Fig. 6.11 Sound level fluctuation of the road traffic noise recorded in Ikeda city, Osaka. Plotting data are expressed as $L_{eq,10min}$.

6.3.2 予測計算の結果及び考察

TTS の予測計算の対象としたテスト周波数は、0.5, 1, 2, 3, 4, 6, 8 kHz である。周波数スペクトルのパターンは、6.2 の模擬道路交通騒音とは異なり、時々刻々変動しているものと考えられる。従って、各テスト周波数に対応する TTS の臨界帯域⁹⁾の中心周波数におけるスペクトルレベル S の算出は、次のような手順で行った。まず毎 2 s の時点で、そのテスト周波数に対応する臨界帯域を包含する 2～3 の 1/3 オクターブバンド群のレベルについてエネルギー和を求めた。その dB 変換値から 1/3 オクターブバンド群の帯域幅の dB 表示値を差し引いて、求めるスペクトルレベル S の値とした。具体的

には、中心周波数 f (Hz) の $1/3$ オクターブバンドレベルを TBL_f とすると、各テスト周波数のスペクトルレベルは、次式から算出される。

テスト周波数: 0.5 kHz

$$S = 10 \log_{10} (10^{TBL_{400}/10} + 10^{TBL_{500}/10} + 10^{TBL_{630}/10}) - 25.5 \quad (6.9)$$

テスト周波数: 1 kHz

$$S = 10 \log_{10} (10^{TBL_{630}/10} + 10^{TBL_{800}/10} + 10^{TBL_{1000}/10}) - 27.5 \quad (6.10)$$

テスト周波数: 2 kHz

$$S = 10 \log_{10} (10^{TBL_{1250}/10} + 10^{TBL_{1600}/10}) - 28.3 \quad (6.11)$$

テスト周波数: 3 kHz

$$S = 10 \log_{10} (10^{TBL_{2000}/10} + 10^{TBL_{2500}/10} + 10^{TBL_{3150}/10}) - 32.4 \quad (6.12)$$

テスト周波数: 4 kHz

$$S = 10 \log_{10} (10^{TBL_{2500}/10} + 10^{TBL_{3150}/10} + 10^{TBL_{4000}/10}) - 33.6 \quad (6.13)$$

テスト周波数: 6 kHz

$$S = 10 \log_{10} (10^{TBL_{3150}/10} + 10^{TBL_{4000}/10} + 10^{TBL_{5000}/10}) - 34.5 \quad (6.14)$$

テスト周波数: 8 kHz

$$S = 10 \log_{10} (10^{TBL_{4000}/10} + 10^{TBL_{5000}/10} + 10^{TBL_{6300}/10}) - 35.5 \quad (6.15)$$

以上により算出した S の値に基づいて、第4章で作製したTTSの増大の式及び単位階段関数法⁵⁾により、数値計算を行った結果を Fig. 6.12~6.18 に図示した。各図とも上部はスペクトルレベル S の変動を $L_{eq,10min}$ で表したもので、下部に TTS_2 の変動を示した。レベル変動を近似する時間刻みは 2 s とし、 TTS_2 を計算する時間間隔は 10 min とした。なお、このような環境騒音には日常的に暴露されるので、24 時間周期の変動が繰り返すものと仮定して、96 時間までの変動の予測計算を行った。その内、図には 0~24 時間までの変動を実線で表示して、さらに 24~48 時間及び 48~72 時間の変動を2種類の点線で併せて表示した。

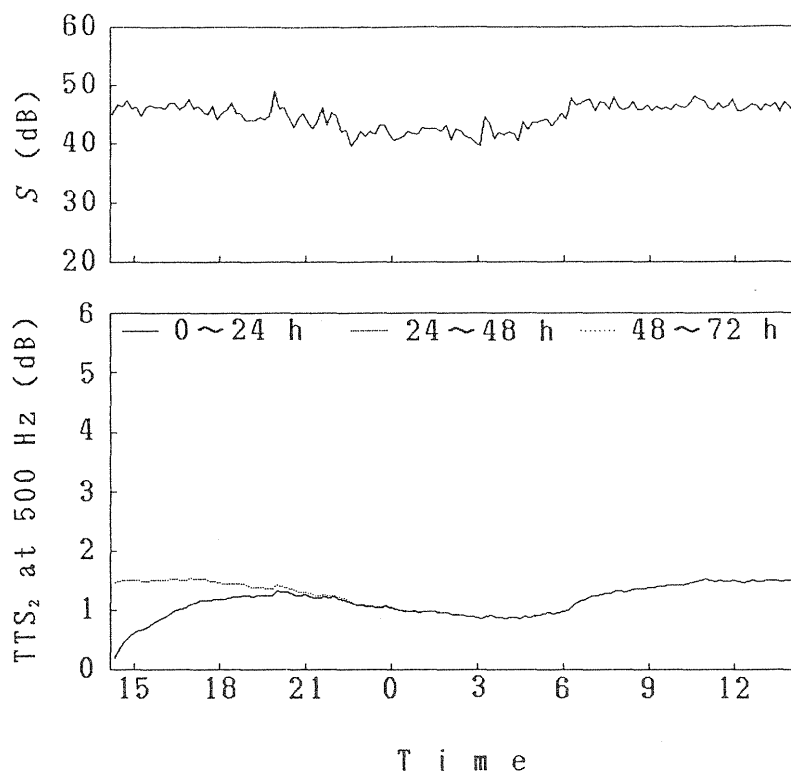


Fig. 6.12 The fluctuation of the spectrum level at the center frequency of the critical band for TTS at 500 Hz (Upper) and TTS_2 at 500 Hz induced by that noise exposure (Lower). The spectrum levels are expressed as $L_{eq,10min}$, and values of TTS are calculated at 10-min intervals.

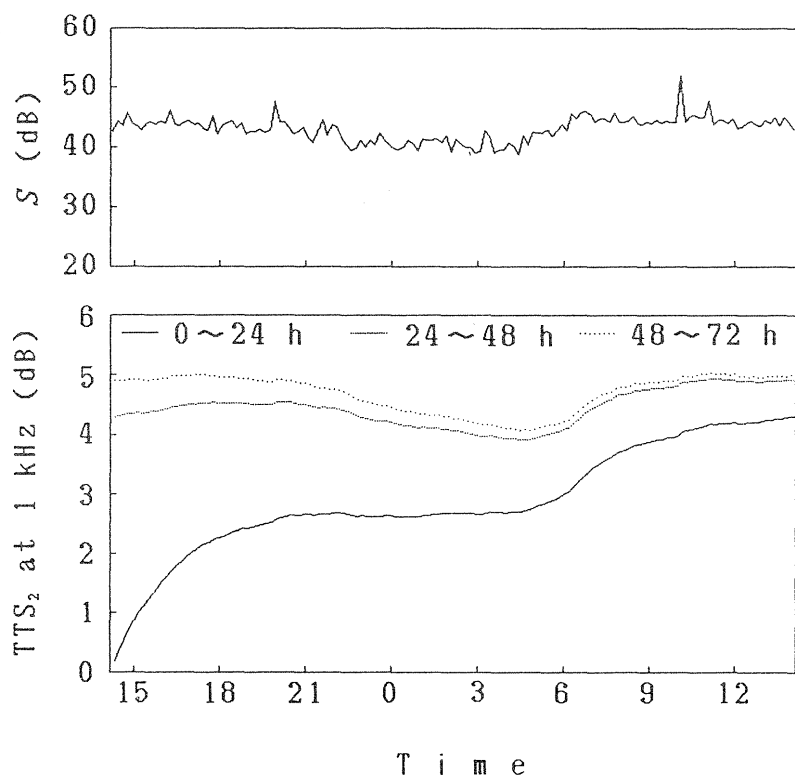


Fig. 6.13 The fluctuation of the spectrum level at the center frequency of the critical band for TTS at 1 kHz (Upper) and TTS_2 at 1 kHz induced by that noise exposure (Lower). The spectrum levels are expressed as $L_{eq,10min}$, and values of TTS are calculated at 10-min intervals.

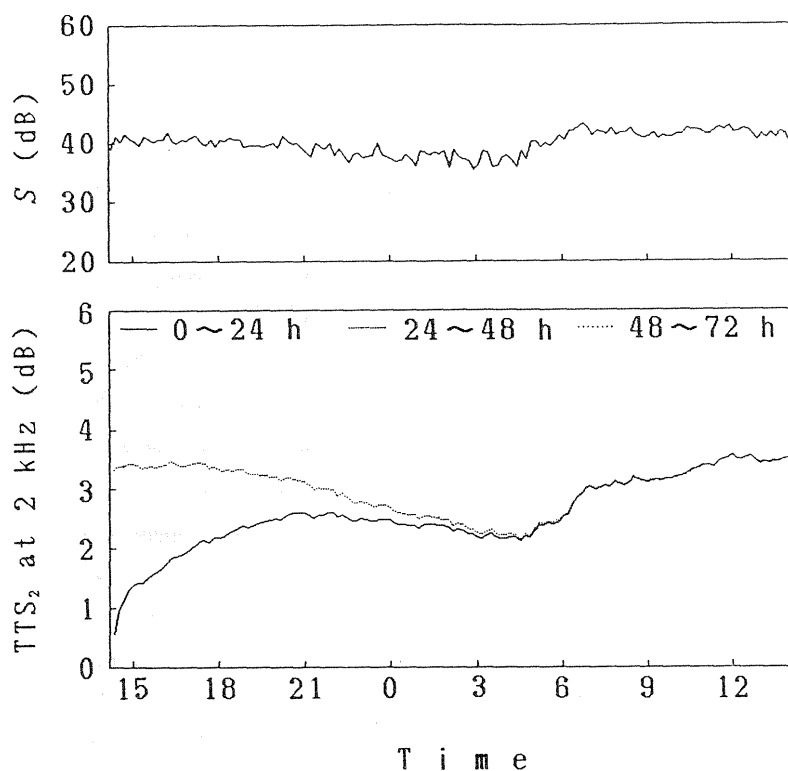


Fig. 6.14 The fluctuation of the spectrum level at the center frequency of the critical band for TTS at 2 kHz (Upper) and TTS_2 at 2 kHz induced by that noise exposure (Lower). The spectrum levels are expressed as $L_{eq,10min}$, and values of TTS are calculated at 10-min intervals.

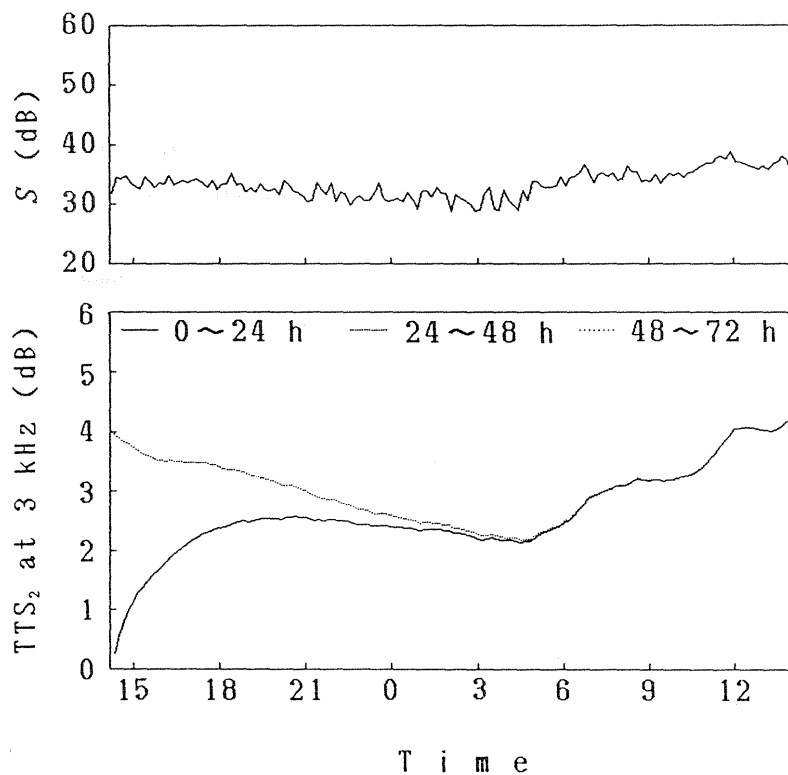


Fig. 6.15 The fluctuation of the spectrum level at the center frequency of the critical band for TTS at 3 kHz (Upper) and TTS_2 at 3 kHz induced by that noise exposure (Lower). The spectrum levels are expressed as $L_{eq,10min}$, and values of TTS are calculated at 10-min intervals.

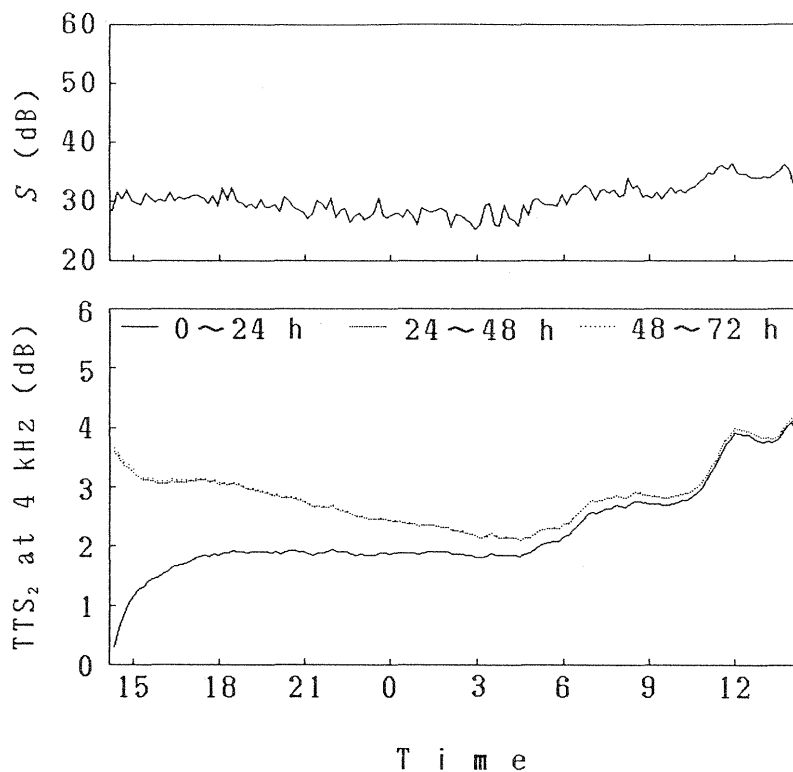


Fig. 6.16 The fluctuation of the spectrum level at the center frequency of the critical band for TTS at 4 kHz (Upper) and TTS_2 at 4 kHz induced by that noise exposure (Lower). The spectrum levels are expressed as Leq_{10min} , and values of TTS are calculated at 10-min intervals.

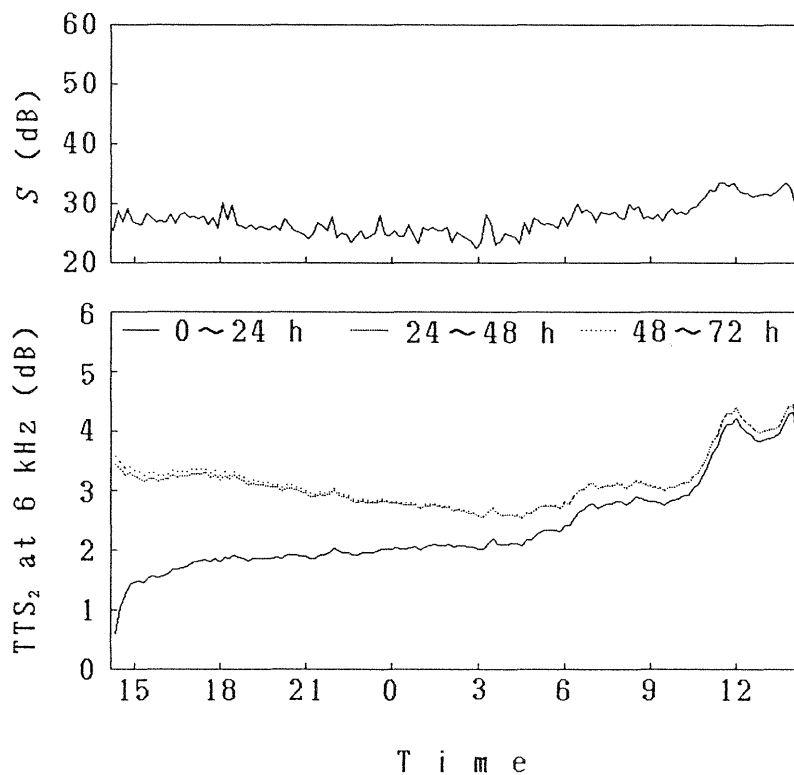


Fig. 6.17 The fluctuation of the spectrum level at the center frequency of the critical band for TTS at 6 kHz (Upper) and TTS_2 at 6 kHz induced by that noise exposure (Lower). The spectrum levels are expressed as Leq_{10min} , and values of TTS are calculated at 10-min intervals.

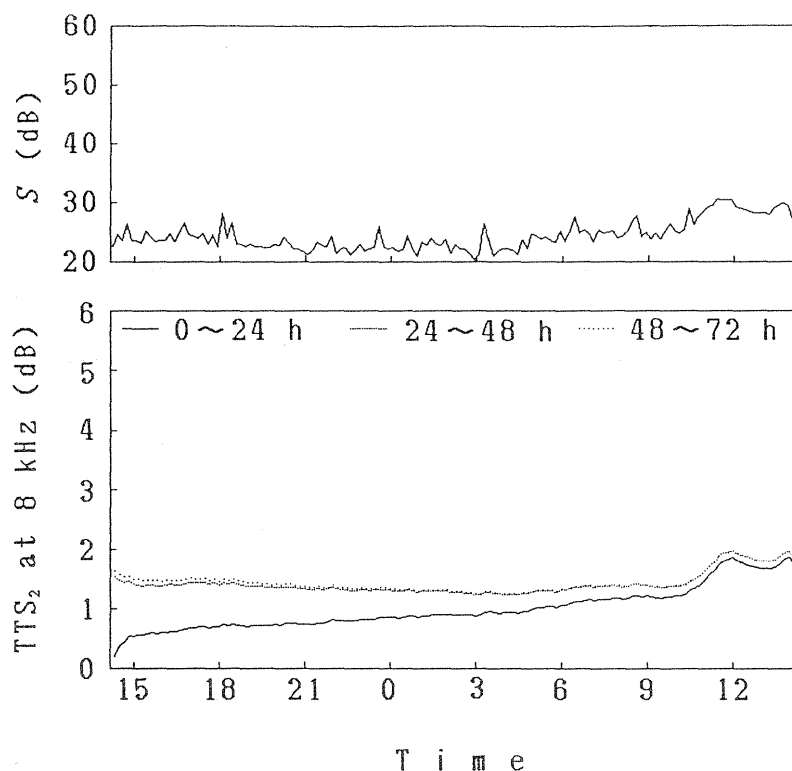


Fig. 6.18 The fluctuation of the spectrum level at the center frequency of the critical band for TTS at 8 kHz (Upper) and TTS₂ at 8 kHz induced by that noise exposure (Lower). The spectrum levels are expressed as Leq_{10min} , and values of TTS are calculated at 10-min intervals.

TTS₂ の動向はテスト周波数によって異なるが、500 Hz, 2 kHz, 3 kHz については、24~48 時間と 48~72 時間の変動はほとんど重なっており、24 時間以降は、24 時間を一周期とする同一の変動を繰り返すようになるものとみなしうる。4, 6, 8 kHz の場合には、24~48 時間と 48~72 時間の変動は後半部分で一致してくるので、48 時間以降になると同一周期変動を繰り返すようになる。1 kHz の場合は TTS の増大の式中の時定数 T_1, T_2 がそれぞれ 94.1, 617.3 min と大きな値となっているために、72 時間以降にならなければ同一周期変動の変動を繰り返すようにはならない。

さらに横軸にテスト周波数を取り、縦軸に 72~96 時間の間の 10 min 毎の TTS₂ の値 ($n=144$) の算術平均値と最大値、最小値をプロットしたものが Fig. 6.19 である。TTS は、テスト周波数 1 kHz において最も大きくなるが、絶対値自体は 3~5 dB 程度のもので、かなり精密な暴露実験を行わないと、有意な TTS を実験的に観測することは難しいものと考えられる。

また、最近パソコンが普及し、これを用いて手軽に予測計算が実行できることが望ましいものと思われる。しかし 2 s 間隔の測定値では、入力データの個数が多くなり、大型計算機ならまだしも、パソコンのレベルでは多大な演算時間が必要となる。そこで Leq

や Z などの時間平均したデータを採用することにより、入力データ数を減少させ、演算時間を減らすことを試みた。Fig. 6.20は、テスト周波数 1 kHz について、平均化時間を 10 min とした $L_{eq,10min}$ と Z_{10min} を階段関数の入力データとした場合についての計算結果を、2 s 間隔の測定値を入力データとした場合と比較して図示したものである。図より分かるように、 L_{eq} では過大な値を与え、 Z では過小な値を与えている。そこで原データである 2 s 間隔の測定値による計算結果と同程度の結果を得るためには、平均化時間をどの程度まで短くすればよいかについてさらに検討した。

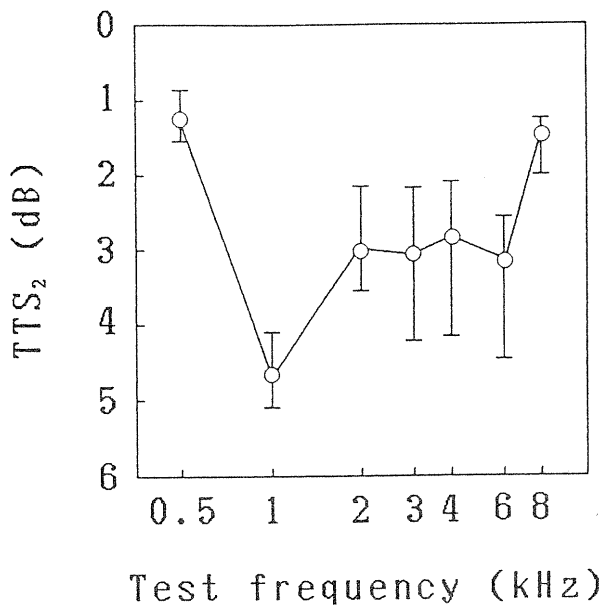


Fig. 6.19 Calculated TTS₂ plotted against test frequency. Open circles indicate the mean values of TTSs calculated at 10-min intervals for 72 h to 96 h noise exposure, and vertical bars show their ranges.

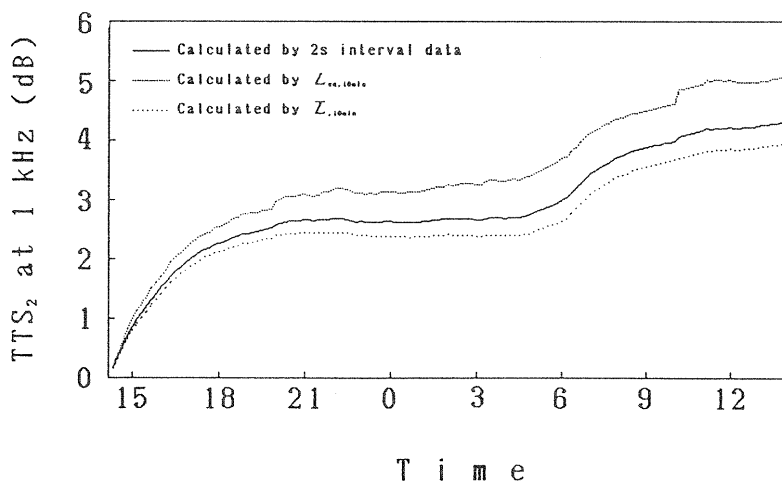


Fig. 6.20 Growth of TTS₂ at 1 kHz calculated from 2-s-interval-data, $L_{eq,10min}$ and Z_{10min} . Values of TTS are calculated at 10-min intervals.

Table 6.2 は、平均化時間を 10 min, 5 min, 2 min, 1 min, 30 s, 20 s, 10 s とした場合の L_{eq} 及び Z を用いて、0～24 時間の TTS_2 の変動を 10 min 刻みで計算した場合の数値を、2 s 間隔の原データを用いて計算した場合のそれで除した比の値の幾何平均値、最大値、最小値を掲載した。 L_{eq} を用いて算出した場合、平均化時間 10 min では 20 %程度過大な値を与えており、平均化時間を短くしていくことにより 1 に近づいていく。10 s では 5 %程度の過大となっている。さらに $\pm 5\%$ の範囲内に入るものを計数したところ、いずれのテスト周波数においても 20 s 以上の平均化時間では皆無であり、10 s ではテスト周波数により 15～60 %のものが含まれる。これに対し、 Z を用いて算出した場合では平均化時間 10 s の場合、 $\pm 5\%$ の範囲内に 33～100 %のものが含まれており、20 s においても 76 %のものが含まれるテスト周波数 (6 kHz) がある。従って、 L_{eq} と Z の比較では、後者の方が原データに基づいた計算結果により近い値を与えるものと言える。第 5 章 5.2 と同様にここでも L_{eq} は、暴露量の指標としては万能ではないことが明らかとなった。しかし、評価尺度として L_{eq} を見た場合、JIS の騒音レベル測定方法¹¹⁾でも取り入れられ、 L_{eq} を出力する測定機器も現在ではよく使用されるようになってきている。従って 10～20 s を平均化時間とする L_{eq} を TTS の予測計算の入力データとして採用することは、むしろ数%の過大な値を与えることから、 Z が若干過小な値をとることに比較して、聴力保護の立場から見ると安全側の評価に結びつく有用な尺度となるものと思われる。

Table 6.2 The ratios of the calculated TTS₂ from L_{eq} or \bar{L} to those from 2 s interval data.

Test frequency			Averaging time						
			10 min	5 min	2 min	1 min	30 s	20 s	10 s
500 Hz	L_{eq}	Mg	1.197	1.190	1.177	1.145	1.108	1.085	1.053
		min	1.117	1.117	1.111	1.090	1.066	1.060	1.039
		max	1.300	1.289	1.259	1.215	1.160	1.116	1.069
	\bar{L}	Mg	0.886	0.888	0.892	0.906	0.926	0.940	0.960
		min	0.830	0.843	0.845	0.865	0.888	0.915	0.948
		max	0.921	0.924	0.927	0.939	0.953	0.956	0.971
	L_{eq}	Mg	1.179	1.173	1.160	1.133	1.100	1.080	1.050
		min	1.118	1.116	1.109	1.086	1.065	1.055	1.038
		max	1.242	1.234	1.216	1.180	1.135	1.103	1.061
1 kHz	\bar{L}	Mg	0.913	0.915	0.918	0.929	0.944	0.954	0.969
		min	0.884	0.888	0.892	0.905	0.924	0.940	0.963
		max	0.940	0.940	0.943	0.953	0.963	0.967	0.978
	L_{eq}	Mg	1.187	1.184	1.172	1.143	1.108	1.086	1.054
		min	1.114	1.111	1.111	1.088	1.068	1.060	1.039
		max	1.293	1.288	1.270	1.227	1.176	1.135	1.082
	\bar{L}	Mg	0.884	0.886	0.889	0.904	0.924	0.937	0.958
		min	0.819	0.830	0.836	0.851	0.875	0.901	0.938
		max	0.920	0.922	0.925	0.940	0.952	0.955	0.970
2 kHz	L_{eq}	Mg	1.204	1.198	1.184	1.150	1.113	1.090	1.058
		min	1.134	1.134	1.127	1.101	1.077	1.060	1.037
		max	1.308	1.291	1.272	1.221	1.172	1.130	1.081
	\bar{L}	Mg	0.891	0.892	0.896	0.908	0.925	0.937	0.956
		min	0.850	0.855	0.858	0.870	0.890	0.910	0.939
		max	0.913	0.913	0.917	0.931	0.945	0.955	0.969
	L_{eq}	Mg	1.199	1.194	1.178	1.145	1.110	1.088	1.057
		min	1.133	1.133	1.126	1.100	1.077	1.061	1.040
		max	1.277	1.266	1.248	1.202	1.162	1.122	1.078
3 kHz	\bar{L}	Mg	0.880	0.882	0.885	0.898	0.916	0.928	0.949
		min	0.849	0.855	0.856	0.868	0.884	0.904	0.931
		max	0.897	0.898	0.904	0.918	0.934	0.944	0.962
	L_{eq}	Mg	1.173	1.170	1.155	1.126	1.095	1.077	1.050
		min	1.118	1.118	1.111	1.091	1.070	1.057	1.037
		max	1.290	1.294	1.223	1.183	1.139	1.118	1.069
	\bar{L}	Mg	0.925	0.926	0.928	0.936	0.946	0.954	0.966
		min	0.889	0.901	0.906	0.915	0.928	0.932	0.954
		max	0.944	0.943	0.945	0.950	0.957	0.965	0.974
4 kHz	L_{eq}	Mg	1.163	1.160	1.144	1.118	1.090	1.074	1.049
		min	1.100	1.096	1.099	1.077	1.062	1.053	1.029
		max	1.315	1.320	1.251	1.194	1.141	1.122	1.075
	\bar{L}	Mg	0.922	0.923	0.924	0.931	0.940	0.947	0.959
		min	0.893	0.893	0.896	0.904	0.918	0.919	0.940
		max	0.946	0.946	0.947	0.952	0.957	0.962	0.976

Mg : Geometric mean

6.4 結論

6.2 では等間隔モデルに基づいた道路交通騒音の模擬音を作製し、残響室内で5名の被験者に8時間にわたり暴露した。暴露音のレベルを L_{eq} で、82, 85, 88, 91 dBA の4段階に変化させて、テスト周波数 2, 4, 6 kHz における域値を被験者の片耳において測定し、以下の結論を得た。

テスト周波数 2 kHz では、暴露レベル $L_{eq}=85$ dBA 以上において、複数の被験者の個人毎の域値並びに5名の域値の平均値に上昇傾向が認められた。

テスト周波数 4 kHz では、暴露レベル $L_{eq}=88$ dBA 以上において、複数の被験者の個人毎の域値に上昇傾向が認められ、平均値では、 $L_{eq}=85$ dBA から上昇傾向が見られた。

テスト周波数 6 kHz では、暴露レベルが上昇しても TTS の増大は認められなかった。

テスト周波数 2 kHz の結果に、第4章で作成した TTS の増大の式を適用して、単位階段関数法を用いて予測計算を行ったところ、実測値に良く追随する計算結果を得た。

6.3 では、実際の道路交通騒音の測定データの一例を取り上げ、第4章で作成した TTS の増大の式を単位階段関数法を用いて適用して予測計算を試みた。今回取り上げた騒音データでは、 $L_{eq,24h} = 74.9$ dBA という騒音暴露が日常的に続いた場合の TTS_2 の予測値は、テスト周波数 1 kHz において最大 5 dB 程度まで上昇し、2~6 kHz では 3 dB 程度まで上昇した。また、暴露レベルの入力データとして L_{eq} を用いた場合、原データに基づいた計算結果よりも過大な予測値を与え、 Z を用いた場合、過小な予測値を与える傾向が見られた。これらの誤差は平均化時間を短縮することにより小さくなっていくが、 Z を用いる方が L_{eq} を用いるよりも、原データに基づく計算結果により近づくことが明らかとなった。しかし、聴力保護の立場から見ると安全側の評価を与える 10~20 s の平均化時間の下で算出した L_{eq} も尺度として有用であることが示唆された。

参考文献

- 1) 山本剛夫, 高木興一, 平松幸三, 山野 啓, “航空機騒音による TTS,” 日本公衛誌 22, 289-296 (1975).
- 2) W.D. Ward, E.M. Cushing and E.M. Burns, “TTS from neighborhood aircraft noise,” J. Acoust. Soc. Am. 60, 182-185 (1976).
- 3) 岡田 諄, 海保葉子, 内藤丈士, 長尾まゆみ, 石井美香子, 中村賢二, 大藤周彦, 吉田吉紀, 佐藤 茂, “騒音暴露による TTS について,” Audiol. Jpn. 20, 247-259 (1977).
- 4) G. Rossi, M. Scevola and C. Magliano, “Temporary threshold shift (TTS) due to exposure to urban traffic noise,” Acta Otolaryng. Suppl. 339, 10-13 (1976).
- 5) T. Yamamoto, H. Shoji and K. Takagi, “Prediction of temporary threshold shift following exposure to noise having arbitrary spectrum and temporal characteristics,” 6th Int. Cong. Acoust. Tokyo, A-2-8, A-9-A-12 (1968).
- 6) 日本音響学会, “道路交通騒音の予測計算方法に関する研究報告書,” (1975).
- 7) 庄司 光, 山本剛夫, 中村隆一, “街頭騒音とくに交通騒音に関する研究, 第一報,” 音響学会誌, 19, 97-105 (1963).
- 8) K. Takagi, T. Yamamoto and H. Shoji, “Permissible noise criteria for hearing conservation,” 7th Int. Cong. Acoust. Budapest, 25S2, 777-780 (1970).
- 9) T. Yamamoto, K. Takagi, H. Shoji and H. Yoneda, “Critical band with respect to temporary threshold shift,” J. Acoust. Soc. Am. 48, 978-987 (1970).
- 10) 山本剛夫, 高木興一, 庄司 光, 米田明彦, “ TTS_t から TTS_2 への変換,” 産業医学, 11, 445-448 (1969).
- 11) 日本工業規格, “騒音レベル測定方法,” JIS Z8731 (1983).

第7章 総括

強大な産業騒音暴露による聴力影響を、TTS を指標として実験的に評価する手法は、既にほぼ確立されていると言ってよいであろう。本研究では、環境騒音のような長時間かつ低レベルの暴露にまでその手法の適用範囲を拡大することを主たる目的として、様々な実験的検討を加えてきた。以下にその研究成果を章を追って要約する。

第2章：

低レベル長時間騒音暴露実験を遂行する上で、検討しておかねばならない因子を取り上げて、それが実験成績に与える影響について考察した。

まず、暴露音場の差が実験結果にどのように反映されるかについて、2.3.1 では、被験者の鼓膜前面における音圧レベルを推定するために、音響測定用マネキンを用いた測定を行った。両音場において、各々に対応した特性を持つマイクロホンを用いて、音場音圧レベルを設定した場合には、マネキンの音圧レベル変換特性は、自由音場の方が、拡散音場のそれを 0.25～8 kHz の周波数領域で上回る。特に、4～8 kHz の間において顕著で、3～9 dB 程度の差が生じた。しかし、いずれの音場においても、自由音場用マイクロホンを用いて、音場音圧レベルを設定した場合には、マネキンの音圧レベル変換特性の差は、4～8 kHz の高い周波数帯域では、-1～3 dB 程度まで小さくなることが判明した。

さらに、2.3.2 では、2つの音場において、同一被験者に同一騒音を暴露し、TTS を測定した。テスト周波数 3, 4 kHz については、自由・拡散両音場における TTS の増大の間には差は認められなかったが、テスト周波数 6, 8 kHz については、自由音場における TTS が拡散音場におけるそれを上回った。しかしその差は、暴露レベルに換算して 3 dB 未満であり、前述したマネキンによる測定結果も併せて勘案すると、両音場において、自由音場用マイクロホンを用いた音場測定の結果が等しければ、鼓膜前面の音圧レベル、ひいては内耳への暴露量は、いずれの音場においても同程度とみなしうることが知られた。

次いで 2.3 においては、被験者の聴力域値を、24 時間にわたり 1 時間毎に測定し、長時間の拘束によっても、域値が有意に上昇しないことを確認した。

第3章:

低レベル長時間騒音暴露による聴力影響を実験的に検討するため 0.9~9 kHz に帯域制限して作成した白色定常騒音を、残響室内で 10 名の被験者に 24 時間にわたり暴露した。暴露音のレベルは 65, 70, 75, 80, 83, 86 dB SPL の 6 段階であり、テスト周波数 2, 3, 4, 6, 8 kHz における TTS を測定した。その結果、65 dB SPL という低い暴露レベルでも、24 時間暴露後には全テスト周波数において、有意な TTS が観測された。

TTS の増大に 1 次遅れ系の指数関数を適用し、飽和値を漸近域値移動 (ATS) としたところ、ATS と暴露レベルとは、ほぼ直線関係にあることが判明した。また ATS の 95% に到達するのに要する時間を求めたところ、1.6~46.0 時間の範囲にばらついており、テスト周波数、暴露レベルによる差は顕著でなかった。

さらに従来の TTS の増大の式による予測計算値との比較を試みたところ、暴露レベル 86 dB SPL では今回の実測値と計算値とで良い一致をみたが、83 dB SPL 以下のレベルではいずれも実測値が計算値を上回り、暴露レベル(量)と TTS (効果)との量-効果関係が S 字状になることが示唆された。

第4章:

低レベル・長時間騒音暴露にまで、適用可能な TTS の増大の予測式を導出する目的で、過去に行われた 8 時間白色騒音暴露実験及び第 3 章の 24 時間白色騒音暴露実験等で得られた TTS データに、種々の関数形を、最小二乗法を用いて当てはめた。その結果、テスト周波数 0.5, 0.8, 1, 1.5, 2, 3, 4, 6, 8 kHz のそれぞれについて、広いレベル範囲にわたって、長時間の騒音暴露に適用できる TTS の実験式が、以下のように求められた。

テスト周波数: 0.5 kHz

$$TTS_0(S, t) = 0.016 \exp(0.102 S) \frac{1 - \exp(-t/15.7)}{1 + 2.00 \exp(-t/105.0)}$$

テスト周波数: 0.8 kHz

$$TTS_0(S, t) = 0.037 \exp(0.101 S) \frac{1 - \exp(-t/62.0)}{1 + 1.77 \exp(-t/257.4)}$$

テスト周波数: 1 kHz

$$TTS_0(S, t) = 0.115 \exp(0.090 S) \frac{1 - \exp(-t/94.1)}{1 + 1.62 \exp(-t/617.3)}$$

テスト周波数: 1.5 kHz

$$TTS_0(S, t) = 1.347 \exp(0.054 S) \frac{1 - \exp(-t/44.8)}{1 + 1.47 \exp(-t/352.0)}$$

テスト周波数: 2 kHz

$$TTS_0(S, t) = 0.063 \exp(0.102 S) \frac{1 - \exp(-t/13.4)}{1 + 1.61 \exp(-t/179.9)}$$

テスト周波数: 3 kHz

$$TTS_0(S, t) = 0.118 \exp(0.103 S) \frac{1 - \exp(-t/41.8)}{1 + 1.16 \exp(-t/182.7)}$$

テスト周波数: 4 kHz

$$TTS_0(S, t) = 0.106 \exp(0.114 S) \frac{1 - \exp(-t/31.8)}{1 + 1.04 \exp(-t/337.6)}$$

テスト周波数: 6 kHz

$$TTS_0(S, t) = 0.261 \exp(0.098 S) \frac{1 - \exp(-t/14.8)}{1 + 1.07 \exp(-t/412.0)}$$

テスト周波数: 8 kHz

$$TTS_0(S, t) = 0.110 \exp(0.112 S) \frac{1 - \exp(-t/17.0)}{1 + 1.41 \exp(-t/458.6)}$$

ただし, TTS_0 : 暴露終了直後の TTS (dB)

S : 暴露音の TTS の臨界帯域の中心周波数におけるスペクトルレベル
(dB)

t : 暴露時間 (min)

である。

第5章:

第4章で作成した TTS の増大の式と単位階段関数法を用いて, 変動騒音暴露による TTS の予測計算を行い, 推定方法としての妥当性を検討した。5.2 では on-time, off-time が, それぞれ 1 min ずつである断続騒音暴露の場合, on-time の間に暴露レベルが, 85~100 dB SPL の範囲内で変動しても, 上記手法により推定可能であることが明らかとなった。また, 増大の式として暴露時間の関数に対数式を用いるよりも, 1次遅れ系の指数関数式或は第4章で作成した TTS の増大の式による方が, 予測精度は良い。今回取り上げた断続暴露に対する on fraction rule の検証では, 実験結果及び予測計算結果のいずれにおいても成立することが確認された。5.3 では duty cycle が 1 s と短くまた,

on fraction も 0.025~0.8 の範囲にあるような騒音暴露実験のデータについても、上記手法により推定可能であることが明らかとなった。また、等エネルギー仮説は、TTS の場合には成立しにくいことが、実験データ及びばかりでなく、その予測計算結果からも判明した。以上のことから、第4章で作成したTTSの増大の式と単位階段関数法を用いた推定方法は、任意の変動騒音暴露に適用可能な汎用性の高い方法であることが示唆された。

さらに、5.4では、回復過程まで含んだ暴露実験データについても予測計算を行い、増大の式によって回復過程まで推定しうるかどうかの検討を行った。その結果、暴露時間よりも回復時間の方が長い場合の実験データについては、TTSの回復過程に、増大過程よりも2倍或はそれ以上の時定数をもつ回復の式を採用した方が、予測精度は高くなることが判明した。しかし現時点では、第4章で作成した増大の式と同程度まで精密な回復の式を作成するだけの、実験データは蓄積されておらず、また増大の式の符号を逆転して回復の式としても、予測精度は極端に悪化することはないので、当面は増大の式を代用してもよいものと思われる。

第6章：

第5章において、TTSの予測方法として妥当性が確認された推定方法を用いて、実際に環境騒音の1例として道路交通騒音を取り上げて、その暴露による聴力影響を検討した。

6.2では等間隔モデルに基づいた道路交通騒音の模擬音を作製し、残響室内で5名の被験者に8時間にわたり暴露した。暴露音のレベルを L_{eq} で、82, 85, 88, 91 dBAの4段階に変化させて、テスト周波数 2, 4, 6 kHzにおける域値を被験者の片耳において測定した。その結果、テスト周波数 2 kHzでは、暴露レベル $L_{eq}=85$ dBA 以上において、複数の被験者の個人毎の域値並びに5名の域値の平均値に上昇傾向が認められた。4 kHzにおいても、暴露レベル $L_{eq}=88$ dBA 以上において、複数の被験者の個人毎の域値に上昇傾向が認められ、平均値では、 $L_{eq}=85$ dBA から上昇傾向が見られた。しかし 6 kHzでは、暴露レベルが上昇してもTTSの増大は認められなかった。

さらにテスト周波数 2 kHzの結果に、第4章で作成したTTSの増大の式を適用して、単位階段関数法を用いて予測計算を行ったところ、実測値に良く追随する計算結果が得られた。

6.3では、実際の道路交通騒音の測定データの一例を取り上げて、第4章で作成したTTSの増大の式を、単位階段関数法を用いて予測計算を試みた。その結果、 $L_{eq,24h}=74.9$ dBAという騒音暴露が日常的に続いた場合のTTS₂の予測値は、テスト周波数

1 kHz において最大 5 dB 程度まで上昇し、2~6 kHz では 3 dB 程度まで上昇した。また、暴露レベルの入力データとして L_{eq} を用いた場合、原データに基づいた計算結果よりも過大な予測値を与え、 Z を用いた場合、過小な予測値を与える傾向が認められた。これらの誤差は平均化時間を短縮することにより小さくなっていくが、 Z の方が L_{eq} よりも、原データに基づく計算結果により近づくことが明らかとなった。しかし、聴力保護の立場から見ると安全側の評価を与える 10 ~ 20 s の平均化時間の下で算出した L_{eq} も有用な尺度であることが示唆された。

以上、結論としては、本研究で作成した TTS の増大の式と単位階段関数法を適用することにより、低レベルかつ変動する環境騒音に暴露される場合の TTS を数値計算で推定することが可能となった。従って、被験者への暴露実験を行わずとも、環境騒音暴露による聴力影響を TTS を指標としてリスクアセスメントを行うことが今後可能である。さらには、産業騒音暴露の評価に際しても、勤務時間外の生活時間帯の騒音暴露も含めて考慮するといった試みも可能となるものと考えられる。

ただし、TTS の回復過程についての十分な実験データを得ることができなかったため、現段階では増大の式を逆転させたものを代用している。回復過程についての精密な実験データを蓄積し、TTS の推定方法の精度をさらに向上させることが研究課題として残されている。

謝 辞

本研究を行うにあたり、終始懇篤な御指導を賜った京都大学工学部衛生工学教室、山本剛夫教授、高木興一助教授に深厚なる謝意を表します。常に助言と指導を惜しまれなかった平松幸三助手に謹んで謝意を表します。

なお、本研究は筆者が同教室に在籍中に行った、修士論文“24時間騒音暴露による一時的域値移動の研究”を契機とし、以降京都大学原子炉実験所、及び財団法人労働科学研究所において継続して行ってきたものである。懇切な指導と快適な研究環境を提供して頂いた原子炉実験所の筒井天尊教授、労働科学研究所の木村菊二研究部長をはじめ、両研究所の諸先生方に厚く感謝の意を表します。

また、友好的な援助を与えられた力丸裕氏、進士靖洋氏、末田一秀氏をはじめ、実験に協力いただいた被験者の方々に深く感謝いたします。

付 録

- (1) 第2章 2.3 の非騒音暴露時における聴力域値の変動について、各被検者の聴力レベルの測定値を Table A. 1～A. 5 に掲載した。
- (2) 第3章の24時間白色騒音暴露実験において観測された各被検者の聴力レベルの値を Table A. 6～A. 15 に掲載した。
- (3) 第4章で作製した TTS の増大の式を用いて、予測計算を行った結果を Table A. 16～A. 22 に示した。暴露音は、白色騒音を想定している。それぞれテスト周波数 0.5, 1, 2, 3, 4, 6, 8 kHz における TTS_2 の値を、連続暴露の場合について算出した。

また、第3章では、臨界帯域の中心周波数におけるスペクトルレベル S の算出を以下の様に行った。まず、バンドパスフィルタの帯域幅を、各テスト周波数に応じた TTS の臨界帯域幅に設定し、実際の暴露騒音をろ波して臨界帯域レベルを求める。その値から、dB 表示した臨界帯域幅を差し引いて、 S を求めた。今回の暴露騒音のスペクトルは、平坦であったので、オーバーオールレベルとスペクトルレベルの差は、テスト周波数によらず、38 dB となった。この値は、計算上求めた周波数帯域幅より、やや小さな値となった。Table A. 16～A. 22 の場合も、オーバーオールレベルとスペクトルレベルの差は、同じく 38 dB とした。
- (4) 第6章 6.2 の模擬道路交通騒音暴露実験において観測された各被検者の聴力レベルの値を Table A. 23～A. 27 に掲載した。

Table A.1 Individual hearing level data in 2.3. (Subject:HT)

Time (h)	Hearing level <i>re</i> ISO(1964) (dB)					
	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	6 kHz	8 kHz
0	3.5	2.4	-1.3	-2.2	6.2	8.1
1	7.9	5.0	9.4	-2.8	3.3	6.5
2	5.5	2.8	5.4	-0.6	2.5	7.6
3	3.9	4.1	-4.9	-3.5	4.1	8.9
4	5.0	0.7	6.1	-3.7	3.8	7.9
5	2.9	1.4	3.9	-1.7	6.4	13.1
6	2.2	6.7	3.2	-3.7	1.4	8.4
7	1.2	4.7	2.3	-3.1	5.6	12.3
8	2.4	4.8	4.0	-4.1	4.8	10.5
9	-1.3	3.8	6.4	-2.0	2.0	8.6
10	4.6	4.3	5.8	-5.4	3.1	8.9
11	6.4	-1.5	7.9	-1.4	5.2	10.6
12	3.9	0.0	-6.7	-2.8	5.8	10.2
13	3.0	2.7	-5.2	-6.3	4.4	8.5
14	4.1	4.4	1.4	-3.1	0.4	4.5
15	1.9	6.3	0.4	-2.6	3.5	5.1
16	2.3	-0.5	-6.5	-4.7	4.5	8.5
17	1.4	5.5	0.0	-4.8	-2.2	4.4
18	1.3	-1.8	4.8	-6.6	0.8	4.7
19	-0.1	-3.9	-9.2	-9.9	3.6	7.6
20	1.5	3.5	0.4	-6.5	1.8	6.2
21	2.6	4.7	-4.1	-7.4	4.7	3.4
22	1.5	3.8	-3.8	-5.2	-2.2	4.1
23	7.4	0.0	3.8	-1.4	1.5	3.8
24	7.4	0.2	-5.4	-3.4	0.6	1.7

Table A.2 Individual hearing level data in 2.3. (Subject:KS)

Time (h)	Hearing level <i>re</i> ISO(1964) (dB)					
	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	6 kHz	8 kHz
0	-1.8	-9.3	-7.8	-6.3	12.9	3.5
1	-4.3	-9.3	-5.5	-7.3	6.7	7.0
2	-3.8	-10.4	-2.2	-8.0	10.9	-0.9
3	-6.5	-9.9	-5.3	-4.3	9.1	4.7
4	-5.7	-8.3	-4.3	-5.2	9.3	2.3
5	-7.5	-9.2	1.4	5.7	19.0	12.6
6	-9.9	-7.8	-6.7	-2.4	6.4	3.7
7	-8.0	-10.1	-2.7	-4.7	12.2	8.2
8	-8.0	-5.3	-3.8	-3.6	9.7	5.7
9	-7.5	-10.0	0.5	-0.3	11.0	14.3
10	-5.9	-3.4	-1.7	-6.6	7.0	6.6
11	-7.7	-8.7	-0.8	-3.0	1.8	0.0
12	-2.4	-3.7	-2.2	-2.0	5.4	-2.3
13	-7.2	-10.1	-3.4	-6.1	4.4	4.2
14	-5.8	-6.2	-1.9	-5.7	7.8	7.7
15	-8.2	-8.9	-2.1	-4.8	10.8	5.7
16	-7.9	-8.3	-4.0	-6.5	1.1	-0.2
17	-9.2	-5.3	-1.8	-6.2	2.7	1.0
18	-8.3	-11.8	-5.8	-4.1	6.2	2.8
19	-6.0	-6.2	-2.2	-6.9	3.3	3.2
20	-7.6	-11.4	-3.1	-8.1	1.5	-0.4
21	-9.7	-9.5	-6.4	-7.7	11.0	6.3
22	-9.4	-9.2	-9.3	-10.1	3.2	0.4
23	-7.1	-9.3	-6.4	-8.0	5.8	2.6
24	-6.3	-12.5	-4.3	-5.8	3.1	1.0

Table A.3 Individual hearing level data in 2.3. (Subject:MT)

Time (h)	Hearing level <i>re</i> ISO(1964) (dB)					
	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	6 kHz	8 kHz
0	4.9	-1.8	2.6	-5.1	-0.1	10.7
1	3.9	0.2	3.2	3.6	1.0	8.1
2	4.2	-1.8	1.0	4.3	3.8	5.4
3	8.0	-2.4	2.7	-5.6	-1.8	11.4
4	5.7	0.2	-0.1	5.2	1.4	10.8
5	4.9	-3.9	-1.8	-1.6	1.5	6.7
6	3.9	-2.3	-0.1	-3.5	-3.7	10.6
7	4.7	-2.9	1.7	-2.9	1.1	7.0
8	3.5	-2.7	0.9	-3.6	0.9	5.5
9	5.2	-0.2	2.8	-0.9	0.9	6.0
10	3.8	0.9	1.5	5.9	0.4	6.1
11	3.9	-4.4	1.1	-0.4	-4.3	12.2
12	2.8	-2.4	2.9	-0.7	0.4	6.9
13	5.1	-1.3	-0.6	0.3	2.7	8.4
14	3.3	0.3	0.6	5.3	0.2	10.6
15	2.1	-1.1	-5.0	3.5	1.7	6.5
16	1.8	-2.1	-5.1	-4.7	3.3	10.6
17	2.2	-1.1	1.9	2.8	1.3	10.4
18	2.5	0.5	-0.8	-0.1	-2.1	12.0
19	0.8	-3.0	-1.4	-4.1	3.0	8.4
20	1.6	-3.4	-1.8	2.4	1.7	11.3
21	-1.0	-0.9	1.2	4.6	-4.5	14.6
22	-0.7	-3.2	-9.1	-0.2	3.4	12.3
23	2.5	-0.9	-6.4	-7.4	0.8	8.7
24	4.0	-0.6	-0.2	-1.5	4.0	4.9

Table A.4 Individual hearing level data in 2.3. (Subject:TM)

Time (h)	Hearing level <i>re</i> ISO(1964) (dB)					
	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	6 kHz	8 kHz
0	4.2	-0.3	0.7	2.7	4.2	0.7
1	2.0	-0.7	-2.2	2.0	3.0	2.9
2	4.6	1.6	-1.6	0.9	0.8	3.4
3	1.6	2.8	0.4	2.4	1.6	7.3
4	2.6	1.3	-0.1	2.5	0.8	2.8
5	4.0	0.9	-0.9	3.0	4.6	-1.7
6	2.0	0.7	-2.3	1.6	4.5	-5.0
7	2.5	0.8	-2.3	3.5	4.5	-1.0
8	-0.6	-1.2	-3.0	-0.1	2.2	-1.3
9	1.1	-1.5	-3.8	2.2	5.4	-6.1
10	1.4	-0.9	-2.1	5.1	3.4	-0.3
11	4.5	3.1	-2.4	6.4	6.5	0.5
12	-2.3	-1.3	-2.7	2.2	-0.5	-3.0
13	0.9	-1.6	-1.3	4.6	1.8	-6.2
14	2.1	-1.0	0.4	2.5	-0.7	-0.2
15	2.3	1.7	-1.5	3.2	3.5	-3.3
16	3.3	4.8	-0.8	4.4	4.1	-4.7
17	2.1	4.8	0.2	4.3	0.5	-0.1
18	0.5	3.6	1.0	6.8	2.3	0.1
19	2.0	2.8	-3.6	0.4	-0.9	-3.2
20	1.5	2.2	-4.1	1.6	2.3	-2.1
21	5.5	1.8	-1.1	4.0	6.5	-2.1
22	2.4	3.0	-12.8	-1.1	7.1	1.5
23	1.3	2.4	-7.8	1.2	0.8	2.2
24	1.2	-0.8	-4.7	2.3	3.6	-5.5

Table A.5 Individual hearing level data in 2.3. (Subject:UH)

Time (h)	Hearing level <i>re</i> ISO(1964) (dB)					
	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	6 kHz	8 kHz
0	10.6	4.6	0.7	7.6	13.6	11.7
1	6.9	-0.9	2.6	6.8	8.7	10.9
2	9.0	1.2	6.1	3.5	10.4	8.9
3	9.5	-0.9	7.4	10.2	11.6	10.1
4	6.9	0.1	5.8	10.7	13.2	15.1
5	3.8	-4.0	5.4	4.6	15.6	19.0
6	4.6	-2.3	8.4	2.1	7.4	5.6
7	3.8	-2.2	2.0	2.4	12.1	5.8
8	3.3	-1.5	2.2	3.3	11.3	7.0
9	4.1	-2.1	3.9	9.2	8.4	9.9
10	3.4	-3.8	-1.2	-4.5	9.5	6.8
11	7.3	-3.8	0.1	-0.3	12.2	4.6
12	3.2	-3.0	1.5	3.5	13.8	11.3
13	4.2	-3.6	1.1	1.0	11.7	4.3
14	5.5	-1.7	7.6	2.8	11.3	3.6
15	7.9	-2.7	6.8	10.4	10.0	8.1
16	7.0	-1.2	6.9	3.7	10.3	7.2
17	5.3	0.4	6.6	6.8	8.9	7.7
18	6.9	-3.7	10.1	7.6	11.2	10.1
19	3.9	-3.1	9.2	0.5	2.8	4.8
20	4.3	-5.4	0.9	2.8	10.3	10.4
21	2.8	-3.0	-0.7	-1.0	4.5	0.9
22	1.8	-2.8	0.8	5.6	4.2	10.8
23	0.2	-1.2	-3.1	2.1	7.2	6.7
24	0.6	-3.7	-1.5	4.5	6.4	7.2

Table A.6 Individual hearing level data for 24 h noise exposure experiments.
(Subject: I)

Frequency & level	0	30	60	120	180	240	Exposure time (min)										300	360	420	480	600	720	840	1200	1320	1440
2 kHz																										
CTRL	-4.9	-6.5	-3.6	-4.2	-2.0	-3.8	-3.8	-5.0	-3.1	-3.1	-5.0	-4.4	-4.8	-5.1	-2.8	1.0										
65dB	-4.9	-3.4	-5.1	-5.6	-3.9	-4.1	-5.5	-3.6	-3.5	-2.2	-3.1	-3.1	-2.2	-4.9	-5.0	-3.1										
70dB	-3.2	-1.5	-0.8	-1.4	0.3	-2.1	-0.7	-0.8	0.1	-2.4	1.2	-0.4	-0.8	-0.8	1.1	3.3										
75dB	-2.9	-5.7	-3.3	0.2	-2.2	-2.5	-3.8	-0.9	-3.1	-3.0	1.3	-0.1	-0.9	-0.2	3.2	3.8										
80dB	-1.9	-3.6	-0.9	-0.8	0.0	-3.5	-1.5	0.4	-1.0	-0.9	1.3	1.2	1.3	-4.0	-0.7	2.0										
83dB	-4.9	-3.2	-2.9	-2.5	-0.8	-3.3	-2.1	-0.8	-1.5	0.4	1.0	1.0	3.0	1.3	0.4	5.0										
86dB	-3.7	-1.7	-1.8	-0.6	1.3	0.1	-0.5	0.3	0.5	0.5	2.1	0.0	2.5	1.9	2.8	6.5										
3 kHz																										
CTRL	-3.2	-5.0	-4.0	-3.9	-5.1	-5.5	-2.3	-8.3	-2.3	-4.6	-5.8	-5.4	-3.2	-5.3	-3.9	-0.3										
65dB	-4.1	-7.0	-3.5	-4.6	-4.5	-4.7	-2.3	-2.7	-1.8	-1.4	-1.0	-0.2	0.0	-2.8	-1.0	-0.8										
70dB	-3.4	-4.7	-2.6	-0.8	-1.9	-1.3	-1.5	-0.3	-1.3	0.1	3.6	1.1	1.2	1.1	-0.3	6.3										
75dB	-4.1	-7.4	-4.1	-3.5	-2.0	-1.8	-0.9	0.1	-1.4	0.4	6.3	0.5	-0.6	2.7	5.2	3.3										
80dB	-2.6	-5.9	-2.2	-2.2	-3.1	-4.1	0.2	-1.6	-3.3	-2.0	1.2	-0.9	3.3	2.0	3.7	2.6										
83dB	-6.0	-4.3	-4.3	-0.1	-3.1	-0.2	0.6	0.6	-0.2	-0.8	2.8	1.8	8.4	5.0	5.7	7.4										
86dB	-4.0	-4.7	-6.8	1.4	0.6	0.2	1.6	1.6	3.1	2.5	7.3	5.1	4.9	3.3	4.2	8.5										
4 kHz																										
CTRL	1.3	-0.2	-1.4	-4.1	0.5	-4.8	0.4	5.3	1.4	-3.1	-1.0	-0.3	-1.8	2.0	0.8	17.0										
65dB	5.7	4.6	1.0	2.8	-0.6	4.7	-2.3	6.8	3.1	-0.6	6.6	8.1	5.1	7.4	-0.2	2.1										
70dB	-4.5	4.9	5.7	-1.0	4.5	0.0	3.6	3.3	9.3	3.4	5.8	4.3	3.7	11.6	4.6	5.2										
75dB	-4.5	-0.7	-4.3	-2.3	0.4	4.2	12.2	0.9	7.4	1.7	8.7	8.8	5.3	8.8	11.4	16.5										
80dB	6.1	1.2	2.1	1.7	7.9	5.7	9.1	10.1	-0.7	5.6	11.5	9.0	12.4	17.2	9.5	14.0										
83dB	3.3	2.3	7.8	17.0	13.0	12.0	13.5	14.9	25.3	24.0	20.0	17.3	19.5	18.7	14.1	18.1										
86dB	-4.3	6.5	8.9	16.5	17.0	21.9	20.3	23.4	23.4	26.0	29.8	24.4	28.5	27.6	32.2	25.5										
6 kHz																										
CTRL	10.2	1.2	5.8	9.2	8.9	11.2	12.4	15.2	11.4	13.5	6.4	8.4	10.2	13.2	7.1	13.9										
65dB	9.6	12.4	11.3	7.8	7.8	9.2	9.8	12.8	11.3	13.1	15.5	17.8	17.3	17.2	21.4	17.3										
70dB	8.5	6.5	11.4	14.7	9.9	10.8	11.0	14.0	13.3	15.2	23.4	16.2	13.9	21.8	18.2	18.1										
75dB	7.3	9.5	12.6	14.9	18.5	17.7	17.0	16.9	17.4	17.7	19.8	19.1	22.8	23.8	24.6	24.6										
80dB	7.6	15.1	21.7	20.9	28.2	24.9	21.6	24.9	23.6	26.5	28.7	27.5	28.2	29.0	32.9	28.1										
83dB	10.0	23.0	21.6	29.0	31.3	31.4	31.2	32.4	30.2	32.2	33.5	30.1	29.3	35.4	31.6	36.2										
86dB	10.9	25.5	31.0	34.9	35.7	38.4	34.6	36.2	37.2	36.5	38.7	35.9	35.6	39.8	36.7	43.5										
8 kHz																										
CTRL	13.8	10.0	9.2	7.6	10.5	12.4	15.8	11.4	11.7	13.0	4.2	12.1	5.6	7.5	12.2	27.0										
65dB	9.7	13.1	12.1	11.5	15.1	11.6	9.0	10.0	10.2	15.2	15.9	13.9	17.5	16.6	16.9	13.3										
70dB	18.1	7.3	11.3	10.0	2.3	3.2	5.1	7.8	3.9	8.8	14.2	11.3	12.5	14.3	13.5	11.6										
75dB	12.9	6.6	13.9	13.5	9.6	8.0	8.1	11.8	7.5	11.1	24.6	15.9	16.3	20.1	15.2	13.3										
80dB	12.8	12.2	12.4	10.7	16.3	12.8	17.9	17.2	16.3	13.5	16.4	14.5	18.8	32.2	34.8	22.3										
83dB	7.6	15.8	21.8	25.2	34.6	22.8	24.0	25.9	23.4	22.7	27.3	27.3	28.6	32.6	31.2	28.7										
86dB	5.6	20.7	25.3	30.9	36.7	35.2	36.9	37.5	33.9	37.8	38.8	46.7	38.3	43.4	37.7	40.6										

Table A.7 Individual hearing level data for 24 h noise exposure experiments.
(Subject:KB)

Frequency & level	Exposure time (min)															
	0	30	60	120	180	240	300	360	420	480	600	720	840	1200	1320	1440
2 kHz																
CTRL	6.9	7.0	4.7	7.4	8.6	8.2	10.0	6.8	2.2	3.3	5.0	6.6	8.5	1.7	6.5	6.1
65dB	8.6	10.6	6.1	9.6	8.8	10.4	8.3	9.1	12.8	7.1	6.0	9.0	6.0	6.1	5.7	7.6
70dB	12.2	7.8	8.4	10.0	6.5	10.6	10.5	11.1	6.6	8.3	7.8	9.6	5.3	8.9	8.5	9.7
75dB	10.7	12.8	1.9	-2.5	9.4	7.7	11.1	10.5	12.6	10.4	9.6	9.3	12.1	12.1	13.0	12.9
80dB	11.1	6.5	2.9	7.6	7.2	7.2	10.7	6.5	4.2	9.5	7.7	7.3	8.5	6.9	7.6	9.0
83dB	13.6	3.8	-3.8	-1.3	-1.8	-0.2	6.0	4.4	9.8	7.2	7.5	7.6	8.9	7.3	9.7	7.0
86dB	-4.9	-6.5	-3.6	-4.2	-2.0	-3.8	-3.8	-5.0	-3.1	-3.1	-5.0	-4.4	-4.8	-5.1	-2.8	1.0
3 kHz																
CTRL	7.7	6.2	6.4	5.0	5.0	0.2	-2.5	5.7	2.0	2.3	4.0	4.2	3.8	-2.1	0.9	2.1
65dB	5.6	11.1	6.5	8.0	3.5	7.9	3.2	6.8	8.2	1.9	10.3	7.2	9.2	6.8	10.8	7.2
70dB	10.1	12.0	8.2	9.2	10.2	12.3	11.5	11.9	10.3	7.1	10.6	11.2	11.9	13.1	10.1	13.4
75dB	7.0	8.6	6.3	7.0	8.4	10.5	8.6	9.8	12.0	12.1	15.2	12.5	15.0	15.0	11.7	14.1
80dB	6.9	6.9	9.5	9.5	8.2	8.1	13.0	10.4	8.9	13.9	7.8	14.1	12.7	15.9	10.9	12.2
83dB	7.4	4.5	4.7	11.4	9.6	10.8	14.1	13.2	12.4	15.2	9.4	10.3	17.5	15.1	13.1	11.8
86dB	-3.2	-5.0	-4.0	-3.9	-5.1	-5.5	-2.3	-8.3	-2.3	-4.6	-5.8	-5.4	-3.2	-5.3	-3.9	-0.3
4 kHz																
CTRL	6.9	1.9	3.0	2.9	5.1	1.4	1.0	5.4	4.0	3.3	0.7	5.0	3.5	-2.6	-0.4	4.7
65dB	3.4	5.0	5.3	3.5	4.7	7.9	7.3	5.5	10.0	7.5	9.8	8.4	5.4	6.6	4.4	8.7
70dB	12.0	9.4	4.5	6.1	9.1	10.7	4.6	8.6	6.4	2.1	10.3	8.0	4.6	8.1	4.6	6.2
75dB	6.8	4.8	5.4	7.4	6.8	9.9	8.2	8.5	12.2	7.4	9.9	6.9	8.9	12.3	8.3	8.7
80dB	4.5	3.3	4.9	3.3	4.2	7.3	8.3	9.0	6.2	12.0	6.3	7.2	8.7	8.4	4.9	5.5
83dB	8.5	3.7	4.8	4.2	4.1	3.2	5.6	6.4	5.6	8.7	3.8	9.2	8.5	6.7	9.0	8.9
86dB	1.3	-0.2	-1.4	-4.1	0.5	-4.8	0.4	5.3	1.4	-3.1	-1.0	-0.3	-1.8	2.0	0.8	17.0
6 kHz																
CTRL	9.0	9.7	5.9	8.9	5.6	6.2	7.0	7.5	8.2	3.9	5.1	6.9	7.9	4.4	9.8	3.7
65dB	8.3	20.1	10.7	17.9	6.6	10.1	4.7	6.1	9.9	10.1	11.0	10.0	11.6	13.3	12.1	12.5
70dB	8.5	7.2	11.3	8.7	8.7	17.4	4.6	6.2	9.2	14.6	14.5	9.6	9.7	11.8	5.2	12.3
75dB	2.4	4.3	4.6	4.0	8.7	6.3	7.0	12.4	17.7	15.3	23.3	10.8	15.0	18.8	10.3	17.6
80dB	12.7	8.0	6.4	9.9	17.1	8.9	10.3	13.6	10.7	13.2	14.5	12.7	11.0	18.6	15.8	17.5
83dB	10.9	13.7	14.1	18.5	16.4	19.8	16.4	14.1	19.6	20.2	23.2	26.8	25.4	23.1	25.5	26.4
86dB	10.2	1.2	5.8	9.2	8.9	11.2	12.4	15.2	11.4	13.5	6.4	8.4	10.2	13.2	7.1	13.9
8 kHz																
CTRL	-0.2	3.4	1.3	9.2	3.5	-1.1	-1.0	-2.0	1.5	0.6	-0.7	4.3	0.4	-0.9	-1.1	0.8
65dB	2.4	2.3	3.6	9.2	6.3	3.5	6.2	6.3	2.4	1.9	6.8	6.4	5.0	5.6	6.3	1.0
70dB	1.8	7.9	3.1	3.7	4.4	13.9	3.8	2.9	5.7	3.6	9.2	9.2	8.0	8.7	5.2	7.1
75dB	0.5	1.9	3.2	7.0	6.4	9.1	4.9	7.9	7.6	11.0	13.6	5.8	10.5	10.0	5.6	9.6
80dB	3.1	1.7	5.0	4.3	3.1	4.0	10.1	6.5	2.2	6.9	3.3	3.9	8.9	6.5	4.8	6.4
83dB	2.7	4.6	6.2	3.5	2.7	3.7	7.0	8.9	7.3	12.9	6.2	7.5	15.5	12.0	7.1	6.5
86dB	13.8	10.0	9.2	7.6	10.5	12.4	15.8	11.4	11.7	13.0	4.2	12.1	5.6	7.5	12.2	27.0

Table A.8 Individual hearing level data for 24 h noise exposure experiments.
(Subject:KG)

Frequency & level	Exposure time (min)															
	0	30	60	120	180	240	300	360	420	480	600	720	840	1200	1320	1440
2 kHz																
CTRL	11.0	8.0	14.5	11.3	7.9	9.0	7.3	7.7	9.2	7.8	8.7	10.1	6.5	10.0	11.9	9.0
65dB	12.8	12.8	13.9	10.9	12.7	10.3	13.2	13.7	9.1	11.2	12.3	9.4	10.7	6.0	10.9	14.5
70dB	2.9	13.8	7.1	6.4	10.7	3.8	7.3	7.8	12.6	14.0	5.4	11.1	8.4	8.0	-0.5	5.7
75dB	3.4	11.1	-5.3	7.0	8.0	9.8	9.0	9.7	7.0	11.2	2.9	5.8	-0.2	16.3	11.0	11.0
80dB	10.2	0.8	12.9	8.5	11.4	11.5	6.1	8.1	12.7	11.8	6.3	7.8	7.1	2.9	8.5	10.8
83dB	11.9	11.6	12.1	8.8	9.2	12.7	11.8	13.6	12.6	13.1	12.8	12.4	12.9	12.9	11.4	13.1
86dB	6.0	8.8	2.8	2.0	5.3	6.7	8.2	11.2	0.5	7.6	13.2	8.4	11.4	10.2	12.2	14.5
3 kHz																
CTRL	3.2	5.1	5.3	3.5	1.6	1.4	5.0	2.8	2.6	3.8	1.6	6.4	3.7	1.1	3.9	0.3
65dB	3.3	5.8	2.9	2.1	6.6	7.4	6.8	8.1	10.6	6.4	6.8	9.7	8.8	12.4	9.8	7.9
70dB	4.6	5.9	2.5	5.7	3.5	6.4	5.9	9.0	11.1	7.3	2.5	8.9	4.8	9.6	8.9	8.8
75dB	3.8	1.4	-0.4	5.9	7.6	8.1	7.0	6.4	10.2	10.8	7.7	8.9	13.0	11.3	12.2	11.2
80dB	1.5	4.8	2.6	5.5	10.2	7.1	4.6	6.5	4.1	7.7	9.4	9.0	13.3	11.8	10.8	16.3
83dB	3.9	-2.2	-1.6	1.7	5.8	2.3	7.8	4.8	5.0	3.7	9.7	7.1	6.9	10.9	14.5	8.4
86dB	-1.0	0.9	2.6	9.3	7.3	8.1	10.7	10.7	11.7	10.3	18.6	15.5	15.7	16.7	18.2	16.7
4 kHz																
CTRL	0.4	5.1	4.0	3.7	-1.1	3.1	2.1	3.0	1.0	3.2	3.1	5.6	1.4	1.4	3.7	1.3
65dB	-2.3	1.8	-4.4	0.2	1.3	-0.1	-1.3	3.0	1.3	1.4	2.7	3.0	2.7	0.2	5.8	9.0
70dB	-0.5	-2.4	-2.1	-1.8	-0.7	1.7	0.5	0.9	2.7	0.0	3.4	-0.8	0.9	0.9	3.2	4.8
75dB	2.4	1.4	-2.1	3.4	5.7	4.0	6.6	7.2	8.3	6.9	10.6	8.9	13.5	6.1	10.4	11.2
80dB	2.2	5.3	4.7	5.5	5.9	7.3	5.8	6.4	5.3	9.8	10.8	9.8	12.8	11.7	13.7	11.7
83dB	-0.4	-0.7	-0.7	3.4	6.9	8.7	6.2	12.3	6.8	10.2	10.2	9.6	10.0	13.2	15.1	14.1
86dB	-6.8	2.6	4.6	8.3	10.1	13.5	12.5	15.0	16.2	15.9	21.1	20.2	21.2	18.5	19.8	19.8
6 kHz																
CTRL	1.1	2.9	5.0	-2.3	1.8	-3.8	-3.0	0.1	0.2	2.7	-6.0	1.0	2.4	1.9	1.6	-2.2
65dB	-7.5	6.0	-4.8	3.9	-6.1	-8.3	-4.4	-3.3	-1.5	-0.4	3.3	2.6	0.7	6.5	6.6	7.5
70dB	0.2	-0.7	-2.8	-2.4	-1.5	0.9	-0.8	-4.1	-0.3	2.3	3.1	2.3	-3.0	7.3	2.6	0.6
75dB	2.1	2.7	0.7	5.5	-1.2	5.0	7.1	1.0	7.5	6.8	8.3	7.3	10.1	7.4	13.7	10.9
80dB	-3.5	5.8	9.5	4.6	6.5	7.8	6.6	9.0	7.3	6.6	12.0	10.4	13.8	17.9	14.5	10.6
83dB	-3.5	-2.8	0.3	12.9	6.4	6.9	5.5	7.8	3.8	5.5	13.2	15.7	11.2	21.9	21.1	15.8
86dB	0.0	3.3	9.6	11.8	12.6	9.8	11.8	13.7	15.5	16.0	19.3	21.2	20.8	24.4	22.0	22.2
8 kHz																
CTRL	-8.3	-7.5	-6.6	-6.2	-6.4	-6.2	-6.9	-8.5	-7.7	-7.4	-10.4	-6.6	-5.5	-3.8	-7.9	-6.6
65dB	-5.1	-4.5	-2.0	0.2	-1.4	-3.1	-1.4	-3.7	-1.6	0.7	-0.2	-0.3	0.6	6.3	7.1	7.4
70dB	-9.4	-6.6	-6.9	-4.8	-2.1	-0.7	-1.5	-1.6	-2.2	-3.5	2.6	0.5	1.1	0.7	7.4	3.0
75dB	-5.8	-6.1	0.0	-1.9	-3.2	-2.0	-1.0	1.0	0.6	3.1	2.1	7.5	10.2	10.4	9.2	6.0
80dB	-6.8	-5.2	-5.1	-2.6	-4.7	-3.0	-3.0	-3.9	0.6	0.8	1.0	3.3	7.5	7.5	5.7	8.5
83dB	-3.0	-4.6	-1.7	2.2	2.4	-0.3	5.4	4.7	3.6	3.4	9.7	7.6	7.2	20.1	15.3	11.5
86dB	-9.4	-4.8	1.2	3.5	1.1	4.8	2.8	6.0	9.7	8.2	14.5	13.5	13.7	21.4	15.6	13.0

Table A.9 Individual hearing level data for 24 h noise exposure experiments.
(Subject: SJ)

Frequency & level	Exposure time (min)														
	0	30	60	120	180	240	300	360	420	480	600	720	840	1200	1320 1440
2 kHz															
CTRL	-8.0	-10.7	-7.1	-7.7	-8.9	-7.1	-9.5	-5.8	-9.5	-9.2	-7.6	-7.5	-7.3	-8.1	-8.1 -8.4
65dB	-7.3	-9.0	-8.7	-9.1	-3.9	-6.0	-4.8	-4.7	-4.7	-4.5	-6.2	-5.7	-4.6	-5.6	-7.5 -3.2
70dB	-11.4	-1.7	-6.8	-7.8	-9.3	-4.9	-6.7	-6.5	-7.7	-4.9	-5.7	-7.4	-2.9	-4.5	-3.7 -4.9
75dB	-9.2	-6.7	-6.3	-6.2	-4.2	-1.5	-5.5	-1.3	-2.4	-4.4	-3.9	-2.8	-2.3	-5.1	-5.0 -2.9
80dB	-10.8	-3.7	-5.5	-1.4	-1.7	-1.2	-3.6	-3.1	1.7	-0.2	-1.0	0.8	3.6	-2.5	-2.9 -0.3
83dB	-6.7	-4.6	-6.2	-2.5	-4.8	-4.9	-3.6	-6.0	-3.3	-7.0	-1.4	-4.0	-4.0	-0.8	-1.9 -0.2
86dB	-9.0	-6.9	-2.3	-1.3	-2.5	-4.0	-2.2	-1.4	-0.5	3.0	1.0	-0.9	2.4	3.0	2.8 0.9
3 kHz															
CTRL	4.7	-3.7	1.8	2.2	-4.4	1.4	-0.4	4.0	2.2	1.7	3.0	2.2	-1.1	9.1	-8.1 5.3
65dB	5.6	2.0	3.7	2.9	7.8	4.2	-3.0	-0.9	6.1	-0.9	5.0	7.0	5.0	7.0	3.0 2.9
70dB	2.0	-2.1	0.3	3.4	3.9	-0.4	1.8	-4.8	0.5	0.5	2.5	0.5	-0.4	1.7	-0.9 -0.5
75dB	-4.5	-0.6	-0.9	2.2	-0.8	-3.1	-0.7	1.7	-1.2	2.2	4.5	2.4	5.7	0.9	0.5 3.3
80dB	2.5	0.2	-1.0	2.9	2.5	5.1	3.1	4.6	6.4	5.2	4.5	4.3	6.0	7.8	4.6 3.6
83dB	7.9	0.1	5.0	1.7	-0.5	8.3	7.6	5.2	6.9	4.7	10.3	8.9	10.4	10.8	10.5 11.5
86dB	-3.8	-4.7	1.1	7.0	3.1	5.6	10.2	8.6	11.6	13.3	11.2	14.6	17.5	15.1	11.9 13.8
4 kHz															
CTRL	-0.8	1.9	1.5	5.7	1.0	1.5	-0.5	2.1	-1.2	-3.4	1.1	0.8	1.6	-2.6	1.7 -2.3
65dB	5.6	1.8	2.9	7.2	6.1	0.6	1.5	9.2	4.8	1.3	3.4	3.0	3.8	3.9	1.5 4.4
70dB	3.9	3.4	6.4	7.2	7.4	11.1	4.1	6.4	5.5	6.5	3.0	4.1	10.3	5.9	8.6 6.3
75dB	2.1	3.5	9.8	4.2	4.1	5.1	11.5	7.6	4.6	10.7	11.6	7.5	11.6	9.7	12.7 11.0
80dB	3.8	3.3	8.4	7.0	7.4	5.3	6.9	7.4	9.7	11.5	11.5	9.8	12.0	9.6	9.4 14.9
83dB	3.2	2.8	6.8	8.1	6.9	7.3	10.1	11.2	17.0	7.6	15.6	12.6	12.7	14.0	14.7 12.9
86dB	5.0	10.8	12.7	14.4	19.0	16.6	19.1	20.5	18.7	17.7	24.1	24.0	24.8	25.9	19.3 22.4
6 kHz															
CTRL	14.1	8.2	9.4	2.3	10.0	3.9	10.9	14.7	4.1	15.9	5.2	9.0	15.8	16.2	13.9 12.4
65dB	15.8	17.9	13.0	19.2	14.6	14.6	17.6	20.4	20.4	21.2	18.1	19.8	21.0	22.5	20.5 20.6
70dB	10.4	1.8	12.4	11.9	16.5	15.7	9.5	17.4	17.9	15.2	12.9	10.1	14.0	15.6	9.1 11.5
75dB	12.6	12.4	12.3	9.2	14.4	13.3	17.6	7.0	14.2	18.7	13.0	11.0	11.7	14.3	3.8 12.4
80dB	10.1	4.6	14.5	11.0	8.5	11.0	10.8	10.4	13.8	12.4	14.5	12.9	11.5	13.5	11.0 10.7
83dB	10.4	15.5	18.5	15.3	18.0	16.2	21.6	20.5	6.6	27.8	22.6	22.7	29.7	28.3	22.6 19.3
86dB	5.0	9.1	9.6	18.2	18.9	19.0	18.8	20.7	21.1	15.1	25.1	23.8	25.5	25.5	23.8 21.3
8 kHz															
CTRL	6.1	2.0	8.5	6.6	4.9	9.1	6.3	4.9	6.5	9.6	2.9	7.1	4.7	-1.0	1.5 -1.2
65dB	4.2	3.1	7.3	5.5	-0.6	2.1	0.2	6.9	4.5	4.5	2.6	2.7	4.3	5.5	8.4 6.6
70dB	5.7	9.7	2.4	3.2	0.4	0.7	-4.3	0.1	4.1	2.3	1.3	0.0	6.3	0.5	5.1 3.6
75dB	4.1	0.9	7.4	1.5	-1.4	-0.2	7.1	2.0	1.4	3.9	4.8	0.3	0.8	1.0	0.0 2.9
80dB	12.9	3.4	0.5	0.5	-1.4	0.2	8.1	-1.4	3.6	8.1	8.4	5.6	6.6	3.3	3.2 8.0
83dB	7.6	9.1	6.3	8.3	3.4	7.5	11.4	9.3	4.6	9.5	9.6	9.1	12.9	9.3	8.4 12.9
86dB	7.4	8.1	7.3	6.3	5.3	6.8	13.5	7.5	15.0	7.4	10.1	9.2	10.4	11.1	11.3 7.0

Table A.10 Individual hearing level data for 24 h noise exposure experiments.
(Subject:SD)

Frequency & level	0	30	60	120	180	240	300	360	420	480	600	720	840	1200	1320	1440
2 kHz																
CTRL	-5.5	-7.0	-8.6	-8.5	-9.2	-1.3	-10.4	-10.2	-7.6	-9.6	-1.9	-6.3	-10.2	-6.7	3.0	0.5
65dB	-6.9	-8.8	-6.6	-5.7	-4.3	-5.1	-6.6	-8.6	-3.3	-2.3	-4.3	-1.3	-3.7	-3.8	-5.3	-2.9
70dB	-1.4	0.8	-0.7	1.3	0.2	-0.2	-1.2	0.3	-0.9	3.7	-2.8	-0.7	2.8	3.4	2.4	4.1
75dB	0.7	2.5	3.3	0.4	-0.1	0.5	2.5	3.6	1.2	2.5	4.0	5.5	2.5	2.3	-0.1	-1.2
80dB	0.0	2.0	-1.5	4.6	3.5	3.4	2.9	1.7	4.3	3.2	4.7	7.2	3.1	3.7	-0.3	6.0
83dB	-1.4	-2.3	-1.1	0.8	-1.7	2.4	2.1	3.8	2.9	1.5	1.6	3.6	-0.9	3.1	2.4	4.7
86dB	0.0	0.2	-1.9	-0.5	1.2	1.7	1.2	1.6	5.3	5.1	6.8	7.9	4.7	4.9	8.7	5.9
3 kHz																
CTRL	2.8	0.9	2.3	-0.5	-1.1	-2.7	-1.4	-9.3	0.8	-1.3	-11.0	-1.0	-12.4	-5.1	1.2	-2.5
65dB	4.5	2.5	-7.5	2.9	-2.5	0.0	1.5	3.2	-2.6	-3.8	-1.5	1.9	-2.0	-4.4	1.9	-1.7
70dB	1.9	4.8	2.3	8.2	5.5	2.4	2.3	2.6	3.2	4.9	4.3	3.8	7.9	6.5	3.6	6.5
75dB	4.9	1.6	2.8	5.1	6.9	3.4	7.0	7.1	5.9	7.7	8.8	10.7	9.7	8.4	7.7	7.3
80dB	4.9	-0.3	5.7	7.8	9.2	9.4	10.1	8.5	12.6	7.0	12.5	13.5	12.8	13.5	10.0	13.0
83dB	2.9	-1.2	1.9	7.4	6.0	8.4	11.0	9.4	12.2	9.3	9.9	10.5	9.6	11.2	11.7	13.9
86dB	6.5	1.9	6.5	11.9	12.7	13.2	11.1	12.2	14.9	17.4	19.2	18.2	17.8	15.1	21.5	18.3
4 kHz																
CTRL	-7.2	-6.8	-6.5	-10.7	-6.7	-8.4	-7.2	-8.7	-6.8	-8.1	-5.7	-3.7	-10.3	-6.4	-5.5	-3.3
65dB	-5.2	-7.9	-10.2	-5.2	-5.6	-5.5	-5.6	-6.4	-4.7	-5.1	-1.8	-2.0	-5.8	-4.5	-4.2	-6.5
70dB	-3.8	1.3	-2.7	-4.3	-3.1	-1.8	-1.4	-2.4	-2.9	-0.5	-0.3	0.7	0.0	0.0	-3.3	-2.6
75dB	-2.7	-3.5	-1.7	-0.3	0.5	1.2	2.0	3.3	-0.5	2.8	3.8	6.6	4.4	5.3	0.6	1.7
80dB	-4.6	-7.2	-4.8	2.8	1.9	2.8	2.1	4.4	7.4	7.7	7.0	11.6	8.4	10.4	9.7	10.4
83dB	-5.9	0.6	3.1	10.7	5.8	12.9	9.5	10.6	12.3	11.4	12.4	13.3	10.6	10.4	9.3	11.7
86dB	-5.4	1.4	3.3	10.5	17.1	15.9	12.8	17.0	22.2	23.1	21.9	22.7	21.9	17.6	23.0	20.8
6 kHz																
CTRL	3.1	3.7	3.4	3.8	2.6	6.5	2.5	4.6	0.4	0.6	6.4	3.6	3.1	4.4	2.2	2.9
65dB	7.8	7.0	5.6	5.4	3.2	5.9	7.8	8.1	9.4	7.8	6.8	7.9	9.3	10.9	12.6	10.2
70dB	8.6	3.9	10.7	10.2	8.0	7.6	6.6	11.8	6.2	12.4	21.4	5.8	13.7	13.2	11.6	12.9
75dB	10.2	10.8	7.0	7.5	10.0	9.0	13.3	11.5	15.2	13.1	16.1	16.2	15.0	21.6	26.1	13.4
80dB	10.2	12.8	10.4	15.6	15.3	19.5	17.5	16.1	18.3	20.5	18.3	20.4	21.1	27.7	20.7	24.3
83dB	5.3	15.6	18.4	21.1	20.5	18.9	21.8	24.0	20.2	23.5	22.3	24.2	24.4	23.7	23.8	21.2
86dB	5.7	13.6	16.1	25.7	25.5	28.2	27.4	21.5	28.6	32.6	30.3	29.8	29.9	29.9	27.5	31.0
8 kHz																
CTRL	-0.6	1.1	1.8	7.7	5.9	1.8	1.5	2.2	-0.6	1.7	12.1	3.1	-0.8	-0.6	-0.1	-1.2
65dB	4.1	5.5	5.1	3.9	8.1	3.4	7.6	5.4	5.6	9.7	7.7	4.2	6.4	7.3	8.8	4.6
70dB	7.3	3.1	4.8	7.7	5.0	1.1	0.5	5.6	2.8	4.1	5.8	8.2	4.0	2.6	4.9	11.3
75dB	8.9	3.2	2.0	6.9	9.9	8.4	9.4	5.7	13.8	12.8	8.8	10.3	9.8	6.1	12.5	11.3
80dB	3.7	8.3	7.6	6.9	11.0	9.0	14.0	10.8	6.0	8.1	12.5	11.4	13.0	12.8	18.8	14.3
83dB	-0.1	5.0	6.8	11.8	10.7	11.5	12.7	10.2	9.6	11.7	16.6	19.4	16.1	12.8	20.0	18.3
86dB	-2.0	2.2	11.9	14.7	12.5	21.3	21.8	17.4	16.6	16.2	20.5	21.7	20.2	23.8	19.4	19.9

Table A.11 Individual hearing level data for 24 h noise exposure experiments.
(Subject: T)

Frequency & level	0	30	60	120	180	240	Exposure time (min)										300	360	420	480	600	720	840	1200	1320	1440
2 kHz																										
CTRL	-3.7	-3.8	-3.3	-3.3	-3.1	-4.5	-2.4	-3.6	-2.3	-3.2	-1.1	-1.3	-3.0	-3.3	-5.4	-4.5										
65dB	-0.7	-0.5	-1.3	0.1	1.2	1.5	1.3	0.7	3.1	0.1	3.6	0.8	0.4	3.5	-0.2	2.7										
70dB	-0.3	2.2	0.8	3.2	2.7	2.1	7.0	1.8	3.6	2.1	3.3	4.4	3.9	5.7	2.9	1.8										
75dB	-2.5	0.2	0.3	1.0	2.1	2.0	0.2	1.5	1.7	2.8	2.5	4.3	3.0	2.1	2.7	3.2										
80dB	-2.5	1.0	0.4	1.6	3.2	3.7	2.6	2.5	3.0	4.0	4.2	4.1	4.4	4.7	3.4	5.4										
83dB	-2.3	0.5	0.4	0.2	3.1	2.2	4.0	2.3	1.8	3.3	1.0	4.0	1.5	4.0	3.4	5.6										
86dB	-1.0	1.2	1.6	2.8	4.6	3.9	4.8	4.0	2.9	5.4	4.2	4.9	5.0	8.7	7.9	9.7										
3 kHz																										
CTRL	-8.4	-7.4	-2.3	-6.9	-5.5	-3.4	-7.3	-2.4	-3.6	-0.8	-4.9	-1.8	-1.4	-2.0	-1.5	-3.1										
65dB	-5.7	-9.7	-6.7	-6.9	-6.0	1.4	0.2	-4.7	-0.6	2.2	-0.9	1.7	-4.1	-2.7	-2.8	-3.1										
70dB	-8.1	-1.5	-3.5	0.0	-3.6	-6.9	-2.4	-6.1	-3.0	-2.4	-0.7	-1.0	-2.6	0.6	0.4	-1.6										
75dB	-6.1	-5.0	-2.8	-4.0	-1.0	-2.0	-3.4	-2.6	-1.7	-0.8	-1.5	-1.0	-1.1	-0.3	-0.4	-1.9										
80dB	-10.2	-3.1	-1.7	-0.3	-3.4	0.4	-1.6	0.1	-0.6	-2.2	0.0	1.1	1.4	1.0	-0.7	4.8										
83dB	-3.7	-2.0	-0.6	-0.2	2.5	-0.6	4.9	5.1	3.9	4.3	5.6	9.1	6.3	5.6	6.4	7.4										
86dB	-6.9	-1.0	-2.2	2.7	3.7	4.5	4.1	3.2	3.2	7.6	8.2	9.8	6.7	8.8	8.5	12.3										
4 kHz																										
CTRL	8.0	0.4	3.0	6.4	4.4	6.6	3.3	4.9	-1.0	-3.2	7.0	1.2	5.5	5.3	5.7	3.4										
65dB	-2.7	1.7	2.4	-1.8	1.5	-0.1	2.3	0.7	5.4	-4.3	-0.4	-0.1	2.8	-1.3	6.8	4.6										
70dB	1.5	-1.9	2.1	3.0	-0.3	-5.8	-2.8	-2.4	-1.2	-2.8	1.1	-3.9	-1.9	-0.1	-1.0	5.9										
75dB	-5.8	-2.3	-4.9	-3.5	-3.0	1.3	-2.6	0.3	-1.8	0.0	4.7	1.2	1.7	7.0	5.7	1.3										
80dB	-3.6	-3.4	2.5	-0.1	0.9	1.3	6.5	4.7	6.1	4.9	8.0	10.8	8.0	9.3	10.2	11.6										
83dB	9.2	0.8	7.4	5.2	9.5	11.0	14.4	14.2	15.0	15.4	17.4	19.9	18.8	21.5	19.2	19.7										
86dB	-6.7	4.5	5.0	12.9	13.8	17.0	14.9	17.5	16.1	17.5	22.2	23.4	20.5	20.3	22.1	24.9										
6 kHz																										
CTRL	2.2	1.2	1.2	1.4	1.5	-0.4	-3.0	-0.5	-3.8	-1.6	-0.2	0.7	0.7	-1.2	-3.7	-1.0										
65dB	-0.6	-4.0	-3.9	-1.0	0.3	-3.5	4.2	1.6	-2.6	0.3	-1.5	2.6	0.7	3.8	4.1	2.5										
70dB	2.3	0.3	0.7	-0.6	1.8	3.3	-0.1	0.6	1.0	3.5	3.4	4.9	5.7	7.2	2.0	0.7										
75dB	3.5	2.9	7.3	3.8	4.1	3.2	5.1	2.8	4.3	4.7	7.4	7.2	5.7	8.9	10.2	11.3										
80dB	2.8	1.5	0.7	4.8	3.8	3.1	4.9	5.9	7.7	6.7	9.6	9.1	7.0	9.6	10.0	10.0										
83dB	-4.6	1.5	1.3	3.8	7.5	9.2	9.5	8.8	9.7	10.8	12.5	14.5	13.9	17.1	14.8	16.2										
86dB	2.8	8.3	6.8	11.1	13.5	14.1	14.1	14.1	13.3	14.3	21.8	22.9	19.5	24.4	20.9	21.8										
8 kHz																										
CTRL	3.7	1.5	-0.2	2.7	3.2	5.2	0.2	2.8	2.5	1.0	3.3	8.0	6.9	4.1	5.4	6.1										
65dB	10.0	7.9	7.5	10.4	5.7	9.5	6.3	7.9	12.3	10.6	12.6	9.6	15.3	12.1	12.1	16.7										
70dB	10.4	11.0	9.9	12.8	12.9	11.5	12.9	15.5	11.3	13.5	14.1	16.0	14.1	12.3	13.4	16.6										
75dB	14.6	10.4	14.8	14.5	13.0	17.1	15.9	16.4	17.3	14.5	14.5	17.9	15.9	17.9	22.3	16.0										
80dB	8.8	7.8	2.3	9.7	12.3	14.9	15.4	17.3	14.7	16.3	12.5	14.9	13.7	14.9	18.6	17.5										
83dB	6.9	6.8	9.1	8.9	12.3	17.7	12.5	14.8	13.6	16.7	19.9	19.5	15.0	21.5	23.1	23.0										
86dB	1.0	6.0	12.7	14.0	11.6	17.9	14.7	20.7	18.3	11.8	21.0	16.7	26.6	23.8	23.3	20.9										

Table A.12 Individual hearing level data for 24 h noise exposure experiments.
(Subject: N)

Frequency & level	Exposure time (min)															
	0	30	60	120	180	240	300	360	420	480	600	720	840	1200	1320	1440
2 kHz																
CTRL	-0.3	-4.1	-4.0	-1.5	-4.7	-8.4	-2.8	-2.5	-4.9	-3.3	-4.0	-3.3	-3.1	-2.0	-4.6	-4.5
65dB	-5.4	-1.8	0.2	-0.7	4.2	0.9	-0.6	1.7	2.1	1.8	5.4	6.2	3.1	3.6	2.5	3.6
70dB	-7.1	3.6	1.0	0.5	-1.8	-1.2	0.5	-0.8	-1.7	-0.2	2.2	4.8	3.0	2.4	2.8	3.1
75dB	2.9	-0.8	0.8	3.1	-0.8	1.7	2.3	2.8	0.7	-0.5	4.4	2.9	4.0	7.0	1.4	6.1
80dB	-4.7	0.0	-3.9	5.0	0.5	0.9	-1.8	2.5	-3.7	3.9	0.5	-1.6	1.4	4.4	1.4	-5.2
83dB	-3.1	-3.2	-3.3	-1.7	-4.8	-0.4	1.9	-2.0	2.3	-0.8	4.4	1.5	3.9	6.9	3.2	2.9
86dB	3.4	-1.1	-0.9	-0.4	6.6	2.5	6.4	1.4	-0.3	2.7	2.2	7.2	2.9	6.8	9.1	8.2
3 kHz																
CTRL	-1.4	2.7	-9.3	1.3	1.9	-5.0	-8.2	-4.2	-2.8	-11.1	-8.5	-7.2	-11.1	-7.7	-11.0	-10.1
65dB	0.1	-2.2	1.4	2.9	8.0	2.7	-0.5	3.2	0.6	0.5	5.7	6.4	5.6	5.3	4.8	1.7
70dB	-0.3	-4.3	-3.6	-1.1	0.7	-0.8	-1.1	-0.8	1.7	-3.4	4.5	3.8	4.3	3.2	4.7	2.6
75dB	-3.8	-2.5	-0.7	6.5	9.7	8.0	2.8	9.1	1.3	0.9	14.2	11.4	12.8	6.9	9.6	11.1
80dB	-2.2	2.3	2.3	3.5	6.8	8.3	1.9	8.2	5.4	9.9	5.1	12.3	9.0	6.5	4.0	6.5
83dB	-8.4	-6.0	-4.1	-0.2	3.1	2.7	2.8	2.7	6.1	3.3	6.1	6.1	9.8	8.7	8.0	6.5
86dB	2.5	0.7	-0.2	3.6	7.3	6.1	8.5	7.5	7.3	7.8	11.4	11.5	15.4	13.7	15.4	11.3
4 kHz																
CTRL	-12.6	-12.8	-13.7	-12.4	-11.2	-12.3	-11.5	-13.1	-14.7	-13.6	-13.6	-14.4	-13.9	-12.8	-15.8	-13.7
65dB	-12.5	-10.6	-7.8	-1.5	-4.6	-1.8	-3.5	-1.2	-2.9	-3.2	2.3	5.1	2.3	1.8	-0.8	-1.9
70dB	-10.5	-7.3	-5.8	-2.4	-3.7	1.4	-4.0	-2.3	-0.9	-2.3	2.5	2.1	0.3	0.0	-1.5	-3.3
75dB	-11.4	-8.5	-7.2	-1.6	-0.6	-0.7	-0.8	2.2	1.6	0.8	1.4	2.2	6.5	5.6	4.9	5.4
80dB	-14.1	-7.8	-6.4	-2.7	-3.4	1.9	-0.5	1.6	-0.4	1.6	4.1	3.7	4.2	6.1	3.9	4.7
83dB	-15.6	0.7	1.2	7.3	11.2	11.2	12.9	12.7	14.3	13.1	17.4	18.9	21.7	18.5	18.8	18.7
86dB	-8.7	-1.7	7.0	16.4	20.8	18.9	17.8	20.3	18.8	19.4	21.8	23.2	20.7	26.9	25.0	26.7
6 kHz																
CTRL	-6.9	-8.0	-8.2	-6.9	-8.1	-8.0	-7.3	-6.4	-7.3	-7.5	-7.1	-8.6	-7.3	-5.2	-5.1	-7.8
65dB	-6.2	-6.4	-4.9	-0.5	-6.1	-4.1	-6.7	-5.1	-6.1	-5.0	-0.2	1.7	0.1	1.7	1.3	2.2
70dB	-3.4	-2.1	-0.4	-0.4	-1.1	-1.1	-2.6	0.5	-1.7	-1.2	0.4	2.7	1.5	1.5	0.4	1.8
75dB	-7.7	-4.7	-2.4	-3.7	-1.3	-1.2	-3.0	2.2	1.0	0.4	4.9	5.2	5.3	7.4	4.4	5.9
80dB	-6.1	-2.2	-2.4	2.3	3.5	3.1	1.2	5.7	4.9	3.8	10.1	9.7	8.9	16.6	13.2	12.6
83dB	-4.8	11.9	13.7	18.1	22.0	20.8	25.0	27.1	24.5	26.9	27.4	28.5	30.0	32.3	32.1	28.8
86dB	-4.3	13.2	18.0	22.9	22.8	25.8	24.4	27.5	29.3	28.9	29.4	31.2	32.1	37.9	38.9	36.1
8 kHz																
CTRL	1.2	4.9	5.4	4.2	4.3	1.2	5.8	5.7	-2.3	4.9	4.1	-1.2	6.0	6.2	6.7	3.9
65dB	0.8	7.4	7.5	7.7	11.1	7.5	9.9	8.7	4.4	11.0	13.7	15.0	14.0	14.3	10.6	10.3
70dB	9.0	12.6	13.5	14.2	13.9	10.5	12.9	8.6	10.8	11.3	12.7	13.5	12.6	10.8	12.4	12.9
75dB	1.7	4.3	12.3	10.7	11.5	12.4	10.7	11.1	15.8	17.8	14.5	15.8	15.9	22.7	14.7	18.4
80dB	2.4	10.2	10.0	14.1	14.5	15.9	16.7	12.7	16.8	15.4	18.6	19.2	20.0	24.3	22.8	24.2
83dB	0.1	21.1	22.7	25.3	30.4	28.9	28.0	32.8	30.2	33.2	31.9	31.2	33.3	42.9	36.3	34.0
86dB	6.8	23.3	24.9	30.0	33.5	32.4	33.3	33.8	36.8	34.1	32.1	35.8	35.8	42.2	40.8	38.7

Table A.13 Individual hearing level data for 24 h noise exposure experiments.
(Subject: H)

Frequency & level	Exposure time (min)															
	0	30	60	120	180	240	300	360	420	480	600	720	840	1200	1320	1440
2 kHz																
CTRL	6.4	6.1	6.7	7.6	6.6	2.5	5.5	7.0	7.0	8.8	7.8	10.3	11.9	4.7	8.6	7.3
65dB	1.0	9.9	7.6	12.8	7.5	9.0	13.1	7.2	13.5	16.7	10.5	12.6	12.1	13.4	6.4	10.8
70dB	4.1	11.7	8.1	6.7	11.8	10.2	9.6	11.3	8.0	13.9	9.1	4.2	6.3	10.4	7.3	8.8
75dB	6.2	14.7	12.0	9.1	5.9	8.7	9.7	8.8	7.7	16.7	9.0	12.4	8.2	18.0	14.6	11.3
80dB	4.3	12.9	11.5	15.4	16.5	12.5	14.3	12.7	12.2	13.5	16.3	15.2	17.1	12.8	16.7	19.1
83dB	9.1	13.0	15.4	16.0	13.2	11.9	13.2	14.9	12.3	15.8	13.5	8.1	14.7	14.0	16.3	13.6
86dB	7.4	14.2	9.0	17.8	16.9	14.2	13.9	12.2	14.0	18.0	16.6	18.1	20.7	17.9	21.1	19.1
3 kHz																
CTRL	5.7	-1.5	-2.3	-0.8	1.0	1.6	-3.9	-3.5	2.2	4.1	-1.0	0.4	0.2	4.1	-2.0	5.7
65dB	6.1	6.3	0.1	2.1	8.9	-0.7	3.9	3.6	8.0	5.8	7.0	9.5	4.7	7.7	4.8	8.4
70dB	3.0	-2.4	3.1	7.7	5.6	8.6	1.9	6.0	-2.8	2.3	5.8	3.1	4.9	5.7	5.1	8.2
75dB	3.3	-1.4	7.3	11.8	9.8	4.5	4.9	6.9	10.3	16.6	9.8	11.4	7.4	14.0	7.2	8.8
80dB	8.7	11.8	8.2	13.4	17.2	13.4	12.7	13.0	14.0	14.6	15.8	14.4	17.4	12.8	20.1	17.5
83dB	16.8	13.1	20.9	21.1	19.3	21.3	19.9	23.8	17.9	21.8	22.1	19.6	23.5	23.1	22.4	19.9
86dB	4.1	17.1	10.8	18.1	19.1	18.3	21.0	18.0	19.2	20.2	23.7	25.0	24.0	25.1	24.8	25.9
4 kHz																
CTRL	1.5	-4.0	-3.6	-8.5	-3.5	-0.2	-3.6	2.9	0.5	0.5	5.0	0.3	1.2	0.6	-3.3	5.0
65dB	3.2	2.2	2.6	-2.2	2.2	-2.4	0.8	-0.6	-2.9	1.7	7.6	3.2	4.8	1.2	3.9	-1.5
70dB	4.8	3.4	3.1	-3.2	-0.4	2.1	-4.0	-4.9	-8.9	-1.2	-9.4	-2.5	-7.5	-6.2	0.3	-3.5
75dB	-0.6	5.7	0.7	4.2	-0.5	7.5	-3.0	1.6	2.7	9.7	5.1	3.8	4.8	10.5	2.9	5.8
80dB	6.4	4.2	5.0	4.4	12.1	5.6	5.9	3.7	7.0	10.4	10.2	8.2	9.5	9.2	11.6	9.9
83dB	5.0	9.3	13.0	14.3	13.0	12.8	11.7	18.8	13.3	14.7	20.9	16.3	16.8	17.1	16.3	14.9
86dB	0.6	11.0	9.5	14.2	19.4	18.3	16.0	12.9	15.6	16.5	18.9	21.8	20.7	21.8	22.2	23.0
6 kHz																
CTRL	3.8	4.4	0.0	2.0	7.0	7.3	6.0	2.4	5.4	6.0	2.3	4.0	5.2	6.2	3.5	7.2
65dB	5.2	3.9	6.1	11.6	11.9	11.4	14.0	11.1	12.0	11.0	15.1	12.3	10.7	15.5	9.6	15.6
70dB	8.8	7.0	9.6	6.3	6.5	10.9	11.9	11.0	10.2	11.3	11.7	14.6	14.5	13.2	5.8	10.3
75dB	9.3	10.0	16.0	10.5	21.2	12.0	12.0	21.7	19.8	15.5	20.0	12.6	18.5	13.9	19.5	13.4
80dB	7.6	14.1	12.6	18.0	20.3	16.7	14.0	20.7	19.1	25.8	20.5	24.5	18.8	22.7	37.3	23.9
83dB	8.2	13.1	12.9	13.6	15.7	17.8	21.2	17.9	15.8	18.6	20.0	21.1	21.5	27.2	24.5	18.7
86dB	8.5	17.0	18.3	22.2	23.2	20.1	27.4	24.0	31.3	34.8	36.9	32.8	36.0	42.9	27.8	35.5
8 kHz																
CTRL	3.1	5.3	11.1	9.3	7.6	6.3	9.2	7.8	8.5	-0.7	6.6	9.9	6.9	5.3	3.3	4.3
65dB	8.5	5.7	11.0	7.4	1.4	4.5	7.8	-0.3	5.5	10.7	7.4	2.3	6.6	4.0	7.2	5.9
70dB	12.3	12.4	7.5	9.3	5.6	8.3	11.5	5.7	11.1	11.8	9.7	8.7	13.2	9.3	1.9	7.6
75dB	7.3	5.1	6.0	6.5	7.4	8.5	7.9	2.5	2.2	0.7	2.4	4.9	3.9	10.0	8.7	9.0
80dB	8.7	9.5	9.0	10.5	9.8	7.5	7.4	9.6	9.9	12.8	11.9	13.0	11.8	15.4	12.2	16.3
83dB	8.4	5.6	16.3	9.1	10.1	12.7	4.5	8.9	2.0	8.7	12.5	10.5	17.2	13.6	12.5	13.2
86dB	7.8	6.8	7.6	12.4	8.8	11.8	13.1	11.2	13.0	13.8	21.7	21.1	17.7	17.6	17.4	19.7

Table A.14 Individual hearing level data for 24 h noise exposure experiments.
(Subject: F)

Frequency & level	0	30	60	120	180	240	300	360	420	480	600	720	840	1200	1320	1440
<hr/>																
2 kHz																
CTRL	-4.3	-11.1	-3.1	-2.2	-3.1	-4.1	-4.2	-2.4	-4.3	-5.6	-4.3	-5.4	-6.4	-12.0	-7.8	-5.7
65dB	-4.6	-7.4	-7.6	-8.1	-2.5	-7.1	-6.5	-6.4	-0.3	1.8	-1.4	-2.7	-4.8	-5.5	-6.5	-2.6
70dB	-6.8	-1.3	-0.9	-8.2	-4.0	-4.9	-1.2	-1.1	-3.0	-2.2	-3.4	-2.0	-2.5	-7.0	-9.1	-3.3
75dB	-5.1	-6.6	-5.2	-0.7	-2.9	-4.4	0.8	-5.3	-1.3	-0.6	3.5	-0.3	-2.8	3.1	-7.0	2.1
80dB	-3.8	1.7	-5.6	-2.1	-1.4	-1.5	-3.3	1.2	-2.5	1.8	1.5	-3.5	-3.0	-2.7	0.3	0.3
83dB	-3.9	-5.5	-6.4	-8.9	-6.5	-6.2	-7.0	-5.8	-5.5	-2.1	-6.2	-5.0	-4.5	-8.1	-5.8	-6.5
86dB	-5.9	-5.1	-3.0	-2.4	-0.5	-4.1	-5.8	-2.9	-5.3	-0.1	1.2	0.0	-5.6	-3.1	-0.5	1.0
3 kHz																
CTRL	2.3	2.4	0.5	-0.9	4.5	2.7	5.8	0.1	3.7	0.3	-1.3	-0.1	3.7	1.2	-7.1	-4.4
65dB	5.4	2.5	3.7	-1.1	-0.5	8.4	3.8	2.5	3.3	6.9	9.3	6.9	7.2	3.2	7.6	1.2
70dB	2.7	3.9	0.7	4.5	2.9	7.0	4.8	-2.3	1.6	4.1	4.7	3.0	0.6	6.4	0.4	6.3
75dB	5.0	4.3	7.0	3.7	13.3	4.2	5.4	5.9	6.3	6.5	6.2	12.8	8.6	6.1	9.2	7.9
80dB	2.3	2.0	0.9	7.3	10.4	14.7	9.3	9.0	7.1	10.1	5.2	10.9	10.5	11.3	12.9	7.7
83dB	2.5	5.0	3.3	8.2	1.3	3.6	4.3	5.2	5.5	12.3	9.7	9.5	10.3	12.3	8.4	10.9
86dB	0.2	-2.4	3.7	4.6	9.0	7.0	8.2	11.7	12.9	10.6	13.2	14.5	12.7	17.5	12.0	17.6
4 kHz																
CTRL	0.0	0.7	-1.6	2.6	-3.8	-2.0	-0.5	-0.8	2.5	1.4	-0.2	4.9	2.1	-9.0	0.9	-2.5
65dB	5.1	-1.0	2.8	1.6	-4.6	8.3	0.3	2.7	1.7	5.4	3.0	1.5	8.7	5.9	1.6	-1.3
70dB	4.5	-1.0	-0.9	1.1	-0.8	1.9	0.5	0.5	-0.8	1.1	1.3	-0.1	2.9	-2.3	-3.2	-3.9
75dB	2.7	0.2	2.8	1.5	11.2	2.9	1.9	3.5	3.9	5.7	4.2	14.0	11.8	7.6	4.8	6.4
80dB	4.8	5.1	5.4	9.6	8.1	13.7	9.9	8.6	9.3	12.1	12.1	11.5	11.5	10.6	10.4	7.2
83dB	2.4	0.9	2.3	1.3	5.0	4.8	3.5	7.0	9.2	9.6	13.0	10.6	13.9	8.8	12.3	12.7
86dB	2.0	2.2	6.8	9.7	11.1	11.2	14.3	17.8	14.2	14.1	19.6	18.8	17.7	18.9	18.9	18.2
6 kHz																
CTRL	4.7	2.0	5.7	6.4	6.8	9.1	11.3	8.4	3.7	4.3	0.9	0.6	-1.3	4.3	3.4	1.3
65dB	2.9	4.1	2.4	1.5	13.8	6.1	5.1	2.7	2.1	10.4	7.3	8.4	10.5	6.0	6.9	-1.3
70dB	2.7	3.7	10.6	3.0	12.5	9.0	13.4	5.0	2.2	6.3	7.1	10.1	2.8	3.4	6.4	5.0
75dB	2.3	3.2	4.0	14.5	14.0	5.3	6.9	9.1	10.0	7.9	7.6	18.2	11.3	9.3	10.4	8.8
80dB	8.8	4.2	5.9	10.5	10.9	13.1	8.9	8.2	8.0	11.4	12.5	8.7	10.9	12.1	17.8	6.5
83dB	7.4	7.0	8.5	8.8	15.4	11.6	11.5	8.5	10.5	9.4	14.3	12.3	14.4	18.7	13.3	25.5
86dB	4.9	5.4	7.4	12.0	17.4	10.3	14.6	16.9	20.9	19.2	20.2	22.3	23.3	22.3	28.9	25.4
8 kHz																
CTRL	2.9	1.0	-2.0	2.9	10.0	12.3	14.0	5.9	-2.4	-1.7	-1.7	2.5	0.9	-1.6	-0.9	-3.7
65dB	1.5	-0.7	-0.7	-0.6	2.6	6.0	0.6	2.3	-0.9	0.6	3.5	3.2	4.1	2.5	2.2	-8.4
70dB	1.0	1.0	2.8	-2.0	4.4	4.1	-0.8	0.9	-4.4	-0.4	4.9	3.8	1.1	5.9	6.1	4.9
75dB	-0.9	4.4	2.3	8.4	18.3	7.1	-0.9	5.4	9.1	7.2	7.0	18.2	9.2	9.7	6.5	5.7
80dB	9.9	-1.2	3.6	10.0	6.3	8.3	3.1	7.2	8.3	9.3	12.6	10.9	9.8	10.4	15.4	9.8
83dB	3.0	3.5	1.9	4.2	7.2	7.0	8.3	4.7	4.4	8.9	8.9	7.5	11.8	12.2	14.4	18.2
86dB	-1.2	-0.6	1.9	5.3	8.9	5.5	8.9	14.3	19.6	15.0	10.9	13.2	13.6	16.7	20.1	13.8

Table A.15 Individual hearing level data for 24 h noise exposure experiments.
(Subject: M)

Frequency & level	0	30	60	120	180	240	Exposure time (min)										300	360	420	480	600	720	840	1200	1320	1440
2 kHz																										
CTRL	-6.3	0.3	-3.7	-0.5	-4.0	-3.1	1.4	0.3	-0.5	-2.9	0.0	-1.4	-1.1	3.0	-3.9	-1.3										
65dB	-0.5	-3.0	-6.3	-3.2	0.4	-1.4	-2.3	-4.0	3.0	-2.3	5.8	3.8	-0.5	1.4	1.2	3.1										
70dB	-1.0	-1.3	0.4	3.2	3.2	1.8	3.4	6.0	1.5	4.5	5.7	4.3	4.9	3.6	0.4	4.4										
75dB	-1.1	-0.8	-0.8	8.8	4.1	3.2	4.5	5.9	3.9	6.6	10.4	9.0	8.0	10.9	7.0	10.1										
80dB	-1.6	1.7	2.1	3.0	3.3	7.7	5.2	3.0	7.3	3.0	7.4	7.9	6.3	6.8	6.0	5.4										
83dB	-1.1	4.4	3.7	5.3	2.8	4.6	7.5	4.6	5.0	7.9	7.9	7.1	7.0	7.5	5.7	7.6										
86dB	-1.4	-0.6	-0.1	1.0	4.7	3.8	4.8	3.3	3.8	4.3	3.9	8.5	5.2	8.1	10.0	6.7										
3 kHz																										
CTRL	8.0	5.1	2.9	6.2	3.0	-2.5	2.6	0.7	3.2	1.0	1.4	1.2	3.8	-1.5	0.6	-3.0										
65dB	2.2	1.0	-0.9	4.5	4.5	2.7	5.5	9.7	4.7	7.2	8.5	11.0	6.9	8.0	9.3	7.9										
70dB	4.0	5.9	7.5	11.7	10.8	12.3	13.4	15.8	12.5	13.5	15.1	15.7	15.5	17.3	15.7	16.5										
75dB	5.5	7.0	9.1	10.0	13.5	11.6	13.5	16.8	13.0	13.0	17.2	17.0	14.1	15.8	14.8	16.4										
80dB	6.2	5.8	11.4	15.2	13.0	14.7	16.6	17.1	18.9	16.6	18.5	18.5	17.5	19.9	21.3	20.5										
83dB	4.6	6.5	8.6	13.4	16.1	19.0	19.3	19.3	20.0	18.4	24.2	21.0	22.1	21.5	22.1	23.1										
86dB	3.8	8.6	12.4	22.9	21.5	20.7	23.5	26.7	23.7	25.2	27.6	26.3	25.5	26.5	29.2	28.4										
4 kHz																										
CTRL	5.1	4.7	4.1	5.6	1.6	1.5	1.9	2.2	2.4	1.3	4.2	3.2	4.1	4.3	6.4	1.5										
65dB	0.5	-0.5	-0.9	-0.3	1.5	-2.2	4.3	2.3	7.7	6.3	10.7	9.6	9.2	2.5	6.3	5.2										
70dB	4.8	7.0	4.1	7.9	8.6	8.6	9.3	9.3	10.8	14.1	12.0	11.6	10.7	13.7	8.3	14.5										
75dB	3.1	6.0	6.6	9.9	8.9	11.6	10.5	13.7	13.1	13.6	13.8	12.8	16.1	15.7	10.8	15.0										
80dB	2.9	8.3	9.3	15.5	14.0	17.8	17.0	18.8	18.7	14.7	17.7	21.5	18.7	20.5	19.9	19.5										
83dB	3.8	14.3	18.2	24.1	21.0	25.8	26.9	28.5	28.5	28.7	30.6	27.7	32.2	28.4	29.1	28.6										
86dB	6.2	18.4	20.5	30.0	32.3	32.3	33.1	33.6	34.5	35.8	34.4	35.7	34.7	34.1	37.0	39.1										
6 kHz																										
CTRL	4.7	5.6	3.0	6.7	6.9	3.1	1.6	2.4	4.1	2.6	0.3	2.7	4.1	1.9	1.7	4.5										
65dB	4.5	6.9	0.8	1.2	1.2	2.6	3.0	7.7	5.3	4.9	8.0	9.1	6.7	6.9	3.0	9.8										
70dB	0.3	4.0	4.6	7.7	7.9	6.6	7.3	10.1	5.5	13.8	12.2	9.2	9.6	12.2	8.9	9.1										
75dB	4.1	4.3	5.8	7.8	8.2	8.7	6.0	12.0	9.1	9.5	6.9	10.6	15.3	11.1	10.8	11.6										
80dB	2.3	6.7	10.0	7.1	11.8	12.9	8.1	12.2	14.1	12.3	12.8	15.0	15.0	19.5	19.3	21.2										
83dB	7.2	8.1	10.3	20.1	12.8	16.6	17.7	17.1	17.1	20.5	20.0	21.1	21.1	17.2	19.7	22.5										
86dB	2.2	11.7	14.0	20.8	22.3	24.4	24.4	26.9	23.7	25.7	27.5	31.3	23.2	23.9	30.4	27.0										
8 kHz																										
CTRL	2.3	-3.5	-0.3	2.1	-0.9	-0.6	6.3	0.7	2.0	-3.8	2.0	2.1	-3.0	-0.8	-1.7	1.5										
65dB	-1.8	-4.0	3.0	0.7	-1.9	1.3	0.5	1.4	-1.6	0.6	1.2	4.0	-1.3	-4.0	2.0	4.0										
70dB	-5.1	2.1	1.5	-0.6	0.2	5.9	2.4	4.7	1.0	5.3	4.7	2.1	2.7	3.9	7.0	1.4										
75dB	2.1	1.3	-4.1	-0.7	5.8	1.1	0.7	7.5	3.5	0.1	3.5	9.3	6.4	5.0	2.5	3.9										
80dB	7.1	0.2	0.0	0.5	2.4	-0.4	1.2	3.1	8.4	-0.1	2.2	3.5	2.6	6.9	10.6	10.2										
83dB	-4.7	-3.1	1.0	6.0	3.7	4.0	13.2	8.9	9.0	12.8	13.4	12.5	16.2	9.7	12.6	11.8										
86dB	-2.4	0.0	4.2	8.9	19.4	15.0	13.0	17.9	13.2	18.7	15.2	20.1	18.3	16.8	24.2	21.6										

Table A.16 Calculated values of TTS₂ at 500 Hz. Exposure noises are continuous white noise.

O. A.		Exposure time										
SPL	S.L.											
(dB)	(dB)	2min	4min	8min	16min	30min	1 h	2 h	4 h	8 h	16 h	24 h
60	22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
61	23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
62	24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
63	25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2
64	26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2
65	27	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2
66	28	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3
67	29	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3
68	30	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3
69	31	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4
70	32	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4
71	33	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4
72	34	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5
73	35	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5
74	36	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.6	0.6
75	37	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.7	0.7
76	38	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.7	0.7
77	39	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	0.8	0.8
78	40	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.8	0.9	0.9	0.9
79	41	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	1.0	1.0	1.0
80	42	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.5	0.7	0.9	1.1	1.1	1.1
81	43	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	1.0	1.2	1.2	1.2
82	44	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	1.1	1.3	1.4	1.4
83	45	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.3	1.5	1.5	1.5
84	46	0.1	0.1	0.2	0.4	0.5	0.7	1.0	1.4	1.6	1.7	1.7
85	47	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.1	1.5	1.8	1.9	1.9
86	48	0.1	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.2	1.7	2.0	2.1	2.1
87	49	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.4	1.9	2.2	2.3	2.3
88	50	0.1	0.2	0.3	0.6	0.8	1.1	1.5	2.1	2.5	2.5	2.5
89	51	0.1	0.2	0.4	0.6	0.9	1.2	1.7	2.3	2.7	2.8	2.8
90	52	0.1	0.2	0.4	0.7	1.0	1.4	1.8	2.6	3.0	3.1	3.1
91	53	0.1	0.2	0.5	0.8	1.1	1.5	2.0	2.8	3.3	3.4	3.4
92	54	0.1	0.3	0.5	0.8	1.2	1.7	2.3	3.1	3.7	3.8	3.8
93	55	0.2	0.3	0.6	0.9	1.4	1.9	2.5	3.5	4.1	4.2	4.2
94	56	0.2	0.3	0.6	1.0	1.5	2.1	2.8	3.8	4.5	4.6	4.6
95	57	0.2	0.4	0.7	1.1	1.7	2.3	3.1	4.3	5.0	5.1	5.1
96	58	0.2	0.4	0.8	1.3	1.8	2.5	3.4	4.7	5.6	5.7	5.7
97	59	0.2	0.5	0.8	1.4	2.0	2.8	3.8	5.2	6.2	6.3	6.3
98	60	0.3	0.5	0.9	1.6	2.3	3.1	4.2	5.8	6.8	7.0	7.0
99	61	0.3	0.6	1.0	1.7	2.5	3.4	4.6	6.4	7.6	7.7	7.7
100	62	0.3	0.6	1.1	1.9	2.8	3.8	5.1	7.1	8.4	8.6	8.6

O. A. SPL : Overall sound pressure level, S.L. : Spectrum level

Table A.17 Calculated values of TTS₂ at 1 kHz. Exposure noises are continuous white noise.

O. A. SPL (dB)	S.L. (dB)	Exposure time										
		2min	4min	8min	16min	30min	1 h	2 h	4 h	8 h	16 h	24 h
60	22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
61	23	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8
62	24	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.9
63	25	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6	0.8	0.9
64	26	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.5	0.7	0.9	1.0
65	27	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	0.7	1.0	1.1
66	28	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	1.1	1.2
67	29	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.2	1.3
68	30	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.3	1.5
69	31	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.1	1.4	1.6
70	32	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8
71	33	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	1.0	1.3	1.7	1.9
72	34	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.5	0.7	1.1	1.4	1.8	2.1
73	35	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.2	1.5	2.0	2.3
74	36	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9	1.3	1.7	2.2	2.5
75	37	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.6	1.0	1.4	1.8	2.4	2.8
76	38	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	1.1	1.5	2.0	2.6	3.0
77	39	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	1.2	1.7	2.2	2.8	3.3
78	40	0.0	0.1	0.1	0.3	0.4	0.8	1.3	1.8	2.4	3.1	3.6
79	41	0.0	0.1	0.1	0.3	0.5	0.9	1.4	2.0	2.6	3.4	3.9
80	42	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.9	1.5	2.2	2.8	3.7	4.3
81	43	0.0	0.1	0.2	0.3	0.6	1.0	1.7	2.4	3.1	4.1	4.7
82	44	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	1.1	1.8	2.6	3.4	4.5	5.2
83	45	0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	1.2	2.0	2.9	3.7	4.9	5.7
84	46	0.1	0.1	0.2	0.4	0.8	1.4	2.2	3.1	4.1	5.3	6.2
85	47	0.1	0.1	0.2	0.5	0.8	1.5	2.4	3.4	4.4	5.8	6.8
86	48	0.1	0.1	0.3	0.5	0.9	1.6	2.6	3.7	4.9	6.4	7.4
87	49	0.1	0.1	0.3	0.6	1.0	1.8	2.9	4.1	5.3	7.0	8.1
88	50	0.1	0.2	0.3	0.6	1.1	1.9	3.1	4.5	5.8	7.6	8.9
89	51	0.1	0.2	0.3	0.7	1.2	2.1	3.4	4.9	6.4	8.4	9.7
90	52	0.1	0.2	0.4	0.7	1.3	2.3	3.8	5.4	7.0	9.1	10.6
91	53	0.1	0.2	0.4	0.8	1.4	2.5	4.1	5.9	7.6	10.0	11.6
92	54	0.1	0.2	0.5	0.9	1.6	2.8	4.5	6.4	8.3	10.9	12.7
93	55	0.1	0.3	0.5	1.0	1.7	3.0	4.9	7.0	9.1	12.0	13.9
94	56	0.1	0.3	0.5	1.1	1.9	3.3	5.4	7.7	10.0	13.1	15.2
95	57	0.2	0.3	0.6	1.2	2.1	3.6	5.9	8.4	10.9	14.3	16.6
96	58	0.2	0.3	0.7	1.3	2.2	4.0	6.5	9.2	12.0	15.7	18.2
97	59	0.2	0.4	0.7	1.4	2.5	4.4	7.1	10.1	13.1	17.2	19.9
98	60	0.2	0.4	0.8	1.5	2.7	4.8	7.7	11.0	14.3	18.8	21.8
99	61	0.2	0.4	0.9	1.7	2.9	5.2	8.5	12.1	15.7	20.6	23.9
100	62	0.2	0.5	0.9	1.8	3.2	5.7	9.3	13.2	17.1	22.5	26.1

O. A. SPL : Overall sound pressure level, S.L. : Spectrum level

Table A.18 Calculated values of TTS_2 at 2 kHz. Exposure noises are continuous white noise.

O. A. SPL (dB)	S.L. (dB)	Exposure time										
		2min	4min	8min	16min	30min	1 h	2 h	4 h	8 h	16 h	24 h
60	22	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.6
61	23	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.6	0.6	0.6
62	24	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.7
63	25	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	0.8
64	26	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.6	0.8	0.8	0.8
65	27	0.0	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	0.9	0.9
66	28	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5	0.7	0.9	1.0	1.0
67	29	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.1	1.1
68	30	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.3
69	31	0.1	0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	1.0	1.3	1.4	1.4
70	32	0.1	0.1	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	1.1	1.4	1.5	1.6
71	33	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.9	1.2	1.5	1.7	1.7
72	34	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	1.0	1.3	1.7	1.9	1.9
73	35	0.1	0.2	0.3	0.6	0.7	0.9	1.1	1.5	1.9	2.1	2.1
74	36	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.6	2.1	2.3	2.3
75	37	0.1	0.2	0.4	0.7	0.9	1.1	1.4	1.8	2.3	2.6	2.6
76	38	0.1	0.3	0.5	0.8	1.0	1.2	1.5	2.0	2.6	2.9	2.9
77	39	0.2	0.3	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.2	2.9	3.2	3.2
78	40	0.2	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.9	2.4	3.2	3.5	3.5
79	41	0.2	0.4	0.6	1.0	1.4	1.7	2.0	2.7	3.5	3.9	3.9
80	42	0.2	0.4	0.7	1.1	1.5	1.9	2.3	3.0	3.9	4.3	4.3
81	43	0.2	0.4	0.8	1.3	1.7	2.1	2.5	3.3	4.3	4.8	4.8
82	44	0.3	0.5	0.9	1.4	1.9	2.3	2.8	3.6	4.7	5.3	5.3
83	45	0.3	0.5	1.0	1.5	2.1	2.5	3.1	4.0	5.3	5.8	5.9
84	46	0.3	0.6	1.1	1.7	2.3	2.8	3.4	4.5	5.8	6.5	6.5
85	47	0.4	0.7	1.2	1.9	2.5	3.1	3.8	5.0	6.4	7.1	7.2
86	48	0.4	0.7	1.3	2.1	2.8	3.4	4.2	5.5	7.1	7.9	8.0
87	49	0.4	0.8	1.4	2.3	3.1	3.8	4.6	6.1	7.9	8.8	8.8
88	50	0.5	0.9	1.6	2.6	3.4	4.2	5.1	6.7	8.8	9.7	9.8
89	51	0.5	1.0	1.8	2.8	3.8	4.7	5.7	7.4	9.7	10.7	10.8
90	52	0.6	1.1	2.0	3.1	4.2	5.2	6.3	8.2	10.7	11.9	12.0
91	53	0.7	1.2	2.2	3.5	4.7	5.7	7.0	9.1	11.9	13.2	13.3
92	54	0.7	1.4	2.4	3.8	5.2	6.4	7.7	10.1	13.2	14.6	14.7
93	55	0.8	1.5	2.7	4.3	5.7	7.0	8.5	11.2	14.6	16.2	16.3
94	56	0.9	1.7	3.0	4.7	6.4	7.8	9.5	12.4	16.1	17.9	18.0
95	57	1.0	1.8	3.3	5.2	7.0	8.6	10.5	13.7	17.9	19.8	20.0
96	58	1.1	2.0	3.6	5.8	7.8	9.6	11.6	15.2	19.8	21.9	22.1
97	59	1.2	2.3	4.0	6.4	8.6	10.6	12.9	16.8	21.9	24.3	24.5
98	60	1.3	2.5	4.4	7.1	9.6	11.7	14.2	18.7	24.3	26.9	27.1
99	61	1.5	2.8	4.9	7.8	10.6	13.0	15.8	20.7	26.9	29.8	30.0
100	62	1.6	3.1	5.4	8.7	11.7	14.4	17.5	22.9	29.8	33.0	33.2

O. A. SPL : Overall sound pressure level, S.L. : Spectrum level

Table A.19 Calculated values of TTS₂ at 3 kHz. Exposure noises are continuous white noise.

O. A. SPL (dB)	S. L. (dB)	Exposure time										
		2min	4min	8min	16min	30min	1 h	2 h	4 h	8 h	16 h	24 h
60	22	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	1.0	1.1	1.1
61	23	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.2	1.2
62	24	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.6	0.8	1.0	1.3	1.4	1.4
63	25	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	0.9	1.1	1.4	1.5	1.5
64	26	0.0	0.1	0.1	0.3	0.4	0.7	1.0	1.3	1.5	1.7	1.7
65	27	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	1.9	1.9
66	28	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.2	1.6	1.9	2.1	2.1
67	29	0.0	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9	1.3	1.7	2.1	2.3	2.3
68	30	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	1.0	1.5	1.9	2.3	2.5	2.5
69	31	0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	1.2	1.6	2.1	2.6	2.8	2.8
70	32	0.1	0.1	0.3	0.5	0.8	1.3	1.8	2.4	2.9	3.1	3.1
71	33	0.1	0.1	0.3	0.5	0.9	1.4	2.0	2.6	3.2	3.4	3.5
72	34	0.1	0.2	0.3	0.6	1.0	1.6	2.2	2.9	3.5	3.8	3.8
73	35	0.1	0.2	0.3	0.6	1.1	1.7	2.5	3.2	3.9	4.2	4.2
74	36	0.1	0.2	0.4	0.7	1.2	1.9	2.7	3.6	4.3	4.7	4.7
75	37	0.1	0.2	0.4	0.8	1.3	2.1	3.0	3.9	4.8	5.2	5.2
76	38	0.1	0.2	0.5	0.9	1.5	2.4	3.4	4.4	5.3	5.7	5.8
77	39	0.1	0.3	0.5	1.0	1.6	2.6	3.7	4.9	5.9	6.4	6.4
78	40	0.2	0.3	0.6	1.1	1.8	2.9	4.2	5.4	6.5	7.1	7.1
79	41	0.2	0.3	0.6	1.2	2.0	3.2	4.6	6.0	7.3	7.8	7.9
80	42	0.2	0.4	0.7	1.3	2.2	3.6	5.1	6.6	8.0	8.7	8.7
81	43	0.2	0.4	0.8	1.5	2.5	4.0	5.7	7.3	8.9	9.6	9.7
82	44	0.2	0.5	0.9	1.6	2.7	4.4	6.3	8.1	9.9	10.7	10.7
83	45	0.3	0.5	1.0	1.8	3.0	4.9	6.9	9.0	11.0	11.8	11.9
84	46	0.3	0.6	1.1	2.0	3.4	5.4	7.7	10.0	12.2	13.1	13.2
85	47	0.3	0.6	1.2	2.2	3.7	6.0	8.5	11.1	13.5	14.5	14.6
86	48	0.3	0.7	1.3	2.5	4.1	6.6	9.5	12.3	14.9	16.1	16.2
87	49	0.4	0.8	1.5	2.7	4.6	7.4	10.5	13.6	16.6	17.8	17.9
88	50	0.4	0.8	1.6	3.0	5.1	8.2	11.6	15.1	18.3	19.8	19.9
89	51	0.5	0.9	1.8	3.4	5.6	9.1	12.9	16.7	20.3	21.9	22.1
90	52	0.5	1.0	2.0	3.7	6.2	10.0	14.3	18.5	22.5	24.3	24.4
91	53	0.6	1.1	2.2	4.1	6.9	11.1	15.8	20.5	25.0	26.9	27.1
92	54	0.6	1.3	2.4	4.6	7.7	12.3	17.6	22.7	27.7	29.9	30.0
93	55	0.7	1.4	2.7	5.1	8.5	13.7	19.5	25.2	30.7	33.1	33.3
94	56	0.8	1.6	3.0	5.6	9.4	15.2	21.6	27.9	34.0	36.7	36.9
95	57	0.9	1.7	3.3	6.2	10.4	16.8	23.9	31.0	37.7	40.7	40.9
96	58	1.0	1.9	3.7	6.9	11.6	18.6	26.5	34.3	41.8	45.1	45.4
97	59	1.1	2.1	4.1	7.7	12.8	20.6	29.4	38.1	46.4	50.0	50.3
98	60	1.2	2.4	4.5	8.5	14.2	22.9	32.6	42.2	51.4	55.4	55.7
99	61	1.3	2.6	5.0	9.4	15.7	25.4	36.1	46.8	57.0	>60	>60
100	62	1.5	2.9	5.6	10.4	17.5	28.1	40.0	51.8	>60	>60	>60

O. A. SPL : Overall sound pressure level, S. L. : Spectrum level

Table A.20 Calculated values of TTS_2 at 4 kHz. Exposure noises are continuous white noise.

O. A. SPL (dB)	S. L. (dB)	Exposure time										
		2min	4min	8min	16min	30min	1 h	2 h	4 h	8 h	16 h	24 h
60	22	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	1.2	1.2
61	23	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	0.9	1.1	1.3	1.4
62	24	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0	1.3	1.5	1.6
63	25	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.0	1.2	1.4	1.7	1.8
64	26	0.1	0.1	0.2	0.4	0.6	0.9	1.1	1.3	1.6	1.9	2.0
65	27	0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	1.0	1.2	1.5	1.8	2.1	2.2
66	28	0.1	0.1	0.3	0.5	0.8	1.1	1.4	1.6	2.0	2.4	2.5
67	29	0.1	0.2	0.3	0.5	0.9	1.2	1.6	1.8	2.2	2.6	2.8
68	30	0.1	0.2	0.3	0.6	1.0	1.4	1.7	2.1	2.5	3.0	3.1
69	31	0.1	0.2	0.4	0.7	1.1	1.6	2.0	2.3	2.8	3.3	3.5
70	32	0.1	0.2	0.4	0.8	1.2	1.7	2.2	2.6	3.1	3.7	3.9
71	33	0.1	0.3	0.5	0.9	1.4	2.0	2.5	2.9	3.5	4.2	4.4
72	34	0.1	0.3	0.5	1.0	1.5	2.2	2.7	3.2	3.9	4.7	4.9
73	35	0.2	0.3	0.6	1.1	1.7	2.5	3.1	3.6	4.4	5.2	5.5
74	36	0.2	0.4	0.7	1.2	1.9	2.8	3.5	4.1	4.9	5.9	6.1
75	37	0.2	0.4	0.8	1.4	2.1	3.1	3.9	4.6	5.5	6.6	6.9
76	38	0.2	0.4	0.8	1.5	2.4	3.5	4.3	5.1	6.2	7.4	7.7
77	39	0.3	0.5	0.9	1.7	2.7	3.9	4.9	5.7	7.0	8.3	8.6
78	40	0.3	0.6	1.1	1.9	3.0	4.4	5.4	6.4	7.8	9.3	9.7
79	41	0.3	0.6	1.2	2.1	3.4	4.9	6.1	7.2	8.7	10.4	10.9
80	42	0.4	0.7	1.3	2.4	3.8	5.5	6.8	8.1	9.8	11.6	12.2
81	43	0.4	0.8	1.5	2.7	4.2	6.1	7.7	9.0	11.0	13.0	13.6
82	44	0.5	0.9	1.7	3.0	4.7	6.9	8.6	10.1	12.3	14.6	15.3
83	45	0.5	1.0	1.9	3.4	5.3	7.7	9.6	11.3	13.8	16.4	17.1
84	46	0.6	1.1	2.1	3.8	5.9	8.6	10.8	12.7	15.5	18.3	19.2
85	47	0.6	1.2	2.3	4.2	6.7	9.7	12.1	14.2	17.3	20.6	21.5
86	48	0.7	1.4	2.6	4.7	7.5	10.8	13.6	16.0	19.4	23.0	24.1
87	49	0.8	1.6	2.9	5.3	8.4	12.1	15.2	17.9	21.8	25.8	27.0
88	50	0.9	1.7	3.3	5.9	9.4	13.6	17.0	20.1	24.4	28.9	30.3
89	51	1.0	2.0	3.7	6.7	10.5	15.3	19.1	22.5	27.4	32.4	33.9
90	52	1.1	2.2	4.2	7.5	11.8	17.1	21.4	25.2	30.7	36.3	38.0
91	53	1.3	2.5	4.7	8.4	13.2	19.2	24.0	28.2	34.4	40.7	42.6
92	54	1.4	2.8	5.2	9.4	14.8	21.5	26.9	31.6	38.5	45.6	47.8
93	55	1.6	3.1	5.8	10.5	16.6	24.1	30.1	35.5	43.2	51.2	53.5
94	56	1.8	3.5	6.5	11.8	18.6	27.0	33.7	39.7	48.4	57.3	>60
95	57	2.0	3.9	7.3	13.2	20.8	30.2	37.8	44.5	54.2	>60	>60
96	58	2.2	4.3	8.2	14.8	23.3	33.9	42.4	49.9	>60	>60	>60
97	59	2.5	4.9	9.2	16.6	26.2	38.0	47.5	55.9	>60	>60	>60
98	60	2.8	5.5	10.3	18.6	29.3	42.6	53.2	>60	>60	>60	>60
99	61	3.1	6.1	11.6	20.8	32.9	47.7	59.7	>60	>60	>60	>60
100	62	3.5	6.9	13.0	23.4	36.8	53.5	>60	>60	>60	>60	>60

O. A. SPL : Overall sound pressure level, S. L. : Spectrum level

Table A.21 Calculated values of TTS₂ at 6 kHz. Exposure noises are continuous white noise.

O. A.		Exposure time										
SPL	S. L.											
(dB)	(dB)	2min	4min	8min	16min	30min	1 h	2 h	4 h	8 h	16 h	24 h
60	22	0.1	0.2	0.4	0.6	0.9	1.0	1.1	1.3	1.6	1.9	2.0
61	23	0.1	0.3	0.4	0.7	1.0	1.1	1.2	1.4	1.7	2.1	2.3
62	24	0.1	0.3	0.5	0.8	1.1	1.2	1.4	1.6	1.9	2.3	2.5
63	25	0.2	0.3	0.5	0.9	1.2	1.4	1.5	1.7	2.1	2.6	2.7
64	26	0.2	0.3	0.6	1.0	1.3	1.5	1.7	1.9	2.3	2.8	3.0
65	27	0.2	0.4	0.7	1.1	1.4	1.7	1.8	2.1	2.5	3.1	3.3
66	28	0.2	0.4	0.7	1.2	1.6	1.8	2.0	2.3	2.8	3.4	3.7
67	29	0.2	0.5	0.8	1.3	1.7	2.0	2.2	2.5	3.1	3.8	4.1
68	30	0.3	0.5	0.9	1.4	1.9	2.2	2.4	2.8	3.4	4.2	4.5
69	31	0.3	0.6	1.0	1.6	2.1	2.5	2.7	3.1	3.8	4.6	4.9
70	32	0.3	0.6	1.1	1.7	2.3	2.7	3.0	3.4	4.1	5.1	5.5
71	33	0.4	0.7	1.2	1.9	2.5	3.0	3.3	3.7	4.6	5.6	6.0
72	34	0.4	0.7	1.3	2.1	2.8	3.3	3.6	4.1	5.0	6.2	6.6
73	35	0.4	0.8	1.4	2.3	3.1	3.6	4.0	4.6	5.6	6.8	7.3
74	36	0.5	0.9	1.6	2.5	3.4	4.0	4.4	5.0	6.1	7.5	8.1
75	37	0.5	1.0	1.8	2.8	3.8	4.4	4.9	5.5	6.8	8.3	8.9
76	38	0.6	1.1	1.9	3.1	4.1	4.9	5.4	6.1	7.5	9.1	9.8
77	39	0.6	1.2	2.1	3.4	4.6	5.4	5.9	6.7	8.2	10.1	10.8
78	40	0.7	1.3	2.4	3.8	5.0	5.9	6.5	7.4	9.1	11.1	11.9
79	41	0.8	1.5	2.6	4.2	5.6	6.6	7.2	8.2	10.0	12.3	13.2
80	42	0.9	1.6	2.9	4.6	6.1	7.2	7.9	9.1	11.0	13.5	14.5
81	43	0.9	1.8	3.2	5.1	6.8	8.0	8.7	10.0	12.2	14.9	16.0
82	44	1.0	2.0	3.5	5.6	7.5	8.8	9.6	11.0	13.4	16.4	17.7
83	45	1.2	2.2	3.8	6.1	8.2	9.7	10.6	12.2	14.8	18.1	19.5
84	46	1.3	2.4	4.2	6.8	9.1	10.7	11.7	13.4	16.3	20.0	21.5
85	47	1.4	2.6	4.7	7.5	10.0	11.8	12.9	14.8	18.0	22.1	23.7
86	48	1.5	2.9	5.2	8.3	11.0	13.0	14.3	16.3	19.9	24.3	26.1
87	49	1.7	3.2	5.7	9.1	12.2	14.4	15.7	18.0	21.9	26.8	28.8
88	50	1.9	3.5	6.3	10.0	13.4	15.8	17.4	19.8	24.2	29.6	31.8
89	51	2.1	3.9	6.9	11.1	14.8	17.5	19.2	21.9	26.7	32.7	35.1
90	52	2.3	4.3	7.6	12.2	16.4	19.3	21.1	24.1	29.4	36.0	38.7
91	53	2.5	4.8	8.4	13.5	18.0	21.2	23.3	26.6	32.4	39.7	42.7
92	54	2.8	5.2	9.3	14.9	19.9	23.4	25.7	29.4	35.8	43.8	47.1
93	55	3.1	5.8	10.2	16.4	21.9	25.8	28.3	32.4	39.4	48.3	51.9
94	56	3.4	6.4	11.3	18.1	24.2	28.5	31.3	35.7	43.5	53.3	57.3
95	57	3.7	7.0	12.5	19.9	26.7	31.4	34.5	39.4	48.0	58.8	>60
96	58	4.1	7.8	13.7	22.0	29.4	34.7	38.0	43.4	52.9	>60	>60
97	59	4.6	8.6	15.2	24.2	32.5	38.2	42.0	47.9	58.4	>60	>60
98	60	5.0	9.4	16.7	26.7	35.8	42.2	46.3	52.8	>60	>60	>60
99	61	5.5	10.4	18.4	29.5	39.5	46.5	51.0	58.3	>60	>60	>60
100	62	6.1	11.5	20.3	32.5	43.6	51.3	56.3	>60	>60	>60	>60

O. A. SPL : Overall sound pressure level, S. L. : Spectrum level

Table A.22 Calculated values of TES_2 at 8 kHz. Exposure noises are continuous white noise.

O. A. SPL (dB)	S. L. (dB)	Exposure time										
		2min	4min	8min	16min	30min	1 h	2 h	4 h	8 h	16 h	24 h
60	22	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.6	0.8	1.0	1.2
61	23	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6	0.6	0.7	0.9	1.2	1.3
62	24	0.1	0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1.3	1.4
63	25	0.1	0.1	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	0.9	1.1	1.5	1.6
64	26	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6	0.8	0.9	1.0	1.3	1.6	1.8
65	27	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0	1.1	1.4	1.8	2.0
66	28	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.1	1.3	1.6	2.0	2.3
67	29	0.1	0.2	0.4	0.7	0.9	1.1	1.2	1.4	1.8	2.3	2.5
68	30	0.1	0.2	0.4	0.7	1.0	1.2	1.4	1.6	2.0	2.6	2.8
69	31	0.1	0.3	0.5	0.8	1.1	1.4	1.5	1.8	2.2	2.9	3.2
70	32	0.2	0.3	0.6	0.9	1.3	1.5	1.7	2.0	2.5	3.2	3.6
71	33	0.2	0.3	0.6	1.0	1.4	1.7	1.9	2.2	2.8	3.6	4.0
72	34	0.2	0.4	0.7	1.1	1.6	1.9	2.2	2.5	3.1	4.0	4.4
73	35	0.2	0.4	0.8	1.3	1.8	2.2	2.4	2.8	3.5	4.5	5.0
74	36	0.3	0.5	0.9	1.4	2.0	2.4	2.7	3.1	3.9	5.0	5.6
75	37	0.3	0.5	1.0	1.6	2.2	2.7	3.0	3.5	4.3	5.6	6.2
76	38	0.3	0.6	1.1	1.8	2.5	3.0	3.4	3.9	4.8	6.3	7.0
77	39	0.4	0.7	1.2	2.0	2.8	3.4	3.8	4.3	5.4	7.0	7.8
78	40	0.4	0.8	1.4	2.2	3.1	3.8	4.2	4.9	6.1	7.8	8.7
79	41	0.4	0.8	1.5	2.5	3.5	4.2	4.7	5.4	6.8	8.8	9.7
80	42	0.5	0.9	1.7	2.8	3.9	4.7	5.3	6.1	7.6	9.8	10.9
81	43	0.6	1.1	1.9	3.1	4.3	5.3	5.9	6.8	8.5	11.0	12.2
82	44	0.6	1.2	2.1	3.5	4.9	5.9	6.6	7.6	9.5	12.2	13.6
83	45	0.7	1.3	2.4	3.9	5.4	6.6	7.4	8.5	10.6	13.7	15.2
84	46	0.8	1.5	2.7	4.4	6.1	7.4	8.2	9.5	11.9	15.3	17.0
85	47	0.9	1.7	3.0	4.9	6.8	8.3	9.2	10.6	13.3	17.1	19.1
86	48	1.0	1.9	3.3	5.5	7.6	9.3	10.3	11.9	14.8	19.2	21.3
87	49	1.1	2.1	3.7	6.1	8.5	10.4	11.5	13.3	16.6	21.4	23.8
88	50	1.2	2.3	4.2	6.9	9.5	11.6	12.9	14.9	18.6	24.0	26.7
89	51	1.4	2.6	4.7	7.7	10.6	13.0	14.4	16.6	20.8	26.8	29.8
90	52	1.5	2.9	5.2	8.6	11.9	14.5	16.2	18.6	23.2	30.0	33.4
91	53	1.7	3.3	5.9	9.6	13.3	16.2	18.1	20.8	26.0	33.6	37.3
92	54	1.9	3.6	6.6	10.8	14.9	18.2	20.2	23.3	29.0	37.5	41.7
93	55	2.1	4.1	7.3	12.0	16.7	20.3	22.6	26.0	32.5	42.0	46.7
94	56	2.4	4.6	8.2	13.5	18.6	22.7	25.3	29.1	36.3	47.0	52.2
95	57	2.7	5.1	9.2	15.1	20.9	25.4	28.3	32.6	40.6	52.5	58.4
96	58	3.0	5.7	10.3	16.8	23.3	28.4	31.6	36.4	45.4	58.8	>60
97	59	3.4	6.4	11.5	18.8	26.1	31.8	35.4	40.7	50.8	>60	>60
98	60	3.8	7.1	12.8	21.1	29.2	35.6	39.6	45.6	56.9	>60	>60
99	61	4.2	8.0	14.3	23.6	32.6	39.8	44.3	51.0	>60	>60	>60
100	62	4.7	8.9	16.0	26.4	36.5	44.5	49.5	57.0	>60	>60	>60

O. A. SPL : Overall sound pressure level, S. L. : Spectrum level

Table A.23 Individual hearing level data for 8 h road traffic noise exposure experiments. (Subject:A)

Frequency & level	Exposure time (min)									
	0	30	60	120	180	240	300	360	420	480
2 kHz										
82 dBA	-	-	-	5.8	4.8	6.1	-1.9	4.7	2.8	2.4
85 dBA	1.4	6.7	-1.4	-8.4	-1.7	6.1	6.9	7.5	-5.3	8.7
88 dBA	4.2	-6.1	0.7	2.1	1.3	1.6	4.3	4.6	2.5	4.1
91 dBA	2.9	0.9	4.7	4.2	6.5	6.6	3.9	1.5	6.6	6.1
4 kHz										
82 dBA	-0.2	1.4	1.2	-1.5	1.2	1.3	0.0	-0.6	1.9	-1.8
85 dBA	-4.3	-2.6	-2.6	-0.7	-5.6	-2.0	-0.6	-2.2	-1.7	-3.4
88 dBA	6.2	0.1	1.1	-2.0	-3.5	1.6	-0.1	0.5	-1.8	-3.1
91 dBA	0.0	1.3	0.6	-1.7	0.0	1.5	-1.3	-3.5	-1.6	-3.6
6 kHz										
82 dBA	1.6	2.2	5.9	6.6	10.0	5.8	8.6	4.8	5.3	5.6
85 dBA	0.3	0.7	2.3	4.2	6.6	4.3	3.3	1.5	3.9	2.2
88 dBA	8.5	0.5	4.1	2.8	7.3	3.9	4.2	7.2	3.4	4.5
91 dBA	5.3	1.4	7.5	0.6	5.1	4.8	7.9	2.0	6.0	5.1

Table A.24 Individual hearing level data for 8 h road traffic noise exposure experiments. (Subject:B)

Frequency & level	Exposure time (min)									
	0	30	60	120	180	240	300	360	420	480
2 kHz										
82 dBA	-	-	-	-8.8	-3.5	-5.2	-6.9	-7.8	-7.2	-12.1
85 dBA	-6.9	-7.3	-6.6	-5.7	-9.1	-9.5	-7.2	-5.3	-7.0	-8.1
88 dBA	-6.4	-3.8	-5.3	-2.8	-5.4	-3.0	-0.7	5.0	2.6	2.1
91 dBA	-8.7	-6.9	-1.2	-1.5	-0.6	-1.4	1.5	3.6	1.1	4.9
4 kHz										
82 dBA	-5.1	-7.3	-5.9	-10.0	-6.9	-9.6	-7.9	-4.8	-3.1	-6.4
85 dBA	-4.7	-6.3	-7.1	-5.1	-7.4	-7.1	-8.4	-8.6	-6.6	-8.0
88 dBA	-8.0	-6.9	-2.5	-7.3	-5.3	-4.5	-5.7	-4.8	-1.7	-2.5
91 dBA	-4.9	-4.7	-4.5	-4.6	-1.7	-3.8	-1.5	-0.6	-2.3	1.7
6 kHz										
82 dBA	1.2	-3.3	-0.8	2.9	-3.0	3.5	6.3	4.3	3.6	6.1
85 dBA	4.0	-3.3	-4.7	-4.8	-1.4	-1.8	1.5	-2.8	-2.8	0.2
88 dBA	3.9	-3.4	-5.0	5.9	1.3	4.5	3.4	3.1	-0.5	-4.0
91 dBA	-0.3	2.5	5.4	3.4	4.7	5.0	5.4	4.4	3.5	1.1

Table A.25 Individual hearing level data for 8 h road traffic noise exposure experiments. (Subject:C)

Frequency & level	Exposure time (min)									
	0	30	60	120	180	240	300	360	420	480
2 kHz										
82 dBA	-	-	-	17.9	17.8	14.2	16.6	17.5	16.0	17.0
85 dBA	6.5	9.6	12.6	10.0	10.5	17.6	18.3	16.9	23.2	19.5
88 dBA	7.2	5.7	19.5	19.4	19.8	19.4	23.8	27.4	29.6	23.1
91 dBA	-1.0	-0.8	4.5	10.6	9.0	8.3	14.3	15.4	14.9	19.0
4 kHz										
82 dBA	6.3	6.2	4.5	10.6	10.4	12.0	5.7	3.6	6.9	5.8
85 dBA	1.9	2.9	1.0	0.0	3.8	0.0	1.5	1.4	-0.4	3.8
88 dBA	4.4	-0.2	5.0	5.6	2.8	3.4	2.4	7.2	3.9	3.8
91 dBA	1.0	2.5	2.5	6.7	5.6	1.2	3.8	1.2	3.2	5.7
6 kHz										
82 dBA	7.7	7.4	5.2	8.7	8.5	12.4	8.9	8.1	7.2	6.6
85 dBA	9.9	4.2	5.3	7.3	8.9	5.1	4.5	6.6	6.9	7.0
88 dBA	6.8	2.9	4.0	3.3	5.6	3.2	4.6	5.7	7.0	2.9
91 dBA	3.1	0.9	1.8	4.9	4.9	0.4	1.1	5.7	3.9	1.1

Table A.26 Individual hearing level data for 8 h road traffic noise exposure experiments. (Subject:D)

Frequency & level	Exposure time (min)									
	0	30	60	120	180	240	300	360	420	480
2 kHz										
82 dBA	-	-	-	-1.7	-2.6	-0.6	-5.0	-0.5	-0.9	-1.3
85 dBA	-2.5	-0.4	1.6	0.0	1.3	1.0	3.1	7.2	1.7	5.7
88 dBA	-0.5	6.7	5.2	6.1	9.3	9.4	6.7	6.8	8.4	8.4
91 dBA	-0.4	1.5	-0.1	5.4	3.9	9.7	7.0	8.6	8.0	9.6
4 kHz										
82 dBA	-0.7	-0.1	-1.0	-1.4	-0.3	-2.6	1.2	-4.3	2.2	-0.9
85 dBA	-2.4	-7.7	-5.5	-4.5	-3.9	-0.5	-1.0	3.6	-4.1	1.2
88 dBA	-4.7	-2.2	-0.8	1.4	-0.5	0.2	-1.4	3.9	2.6	2.5
91 dBA	0.2	-1.6	-0.3	3.4	0.9	-2.3	1.6	5.6	1.5	2.9
6 kHz										
82 dBA	-3.6	-1.6	-2.4	-0.1	-0.4	-5.6	-6.3	-1.4	-6.3	1.2
85 dBA	-1.5	-7.8	-1.8	-0.8	-2.9	-0.2	-2.3	-5.1	-0.6	-1.6
88 dBA	0.7	-3.8	2.3	0.9	2.7	0.8	0.2	-5.5	-0.5	-2.8
91 dBA	-0.6	0.0	-1.2	-5.2	1.0	0.4	1.5	2.3	0.2	-2.5

Table A.27 Individual hearing level data for 8 h road traffic noise exposure experiments. (Subject:E)

Frequency & level	Exposure time (min)									
	0	30	60	120	180	240	300	360	420	480
2 kHz										
82 dBA	-	-	-	-0.1	-1.9	-2.3	1.5	-3.4	-5.5	-1.1
85 dBA	-0.8	1.2	-0.2	2.2	1.7	4.2	3.6	5.1	2.7	-2.3
88 dBA	0.4	-1.8	1.1	-0.1	3.0	1.3	2.8	3.5	5.3	8.1
91 dBA	-0.7	5.3	-1.1	5.9	7.5	4.9	5.7	5.5	7.1	7.1
4 kHz										
82 dBA	7.8	4.1	3.6	8.3	9.9	8.2	9.3	7.6	6.7	6.2
85 dBA	2.8	1.8	5.5	6.1	3.7	4.4	3.8	6.5	3.7	5.5
88 dBA	5.0	2.5	4.5	4.7	5.4	5.2	6.5	5.4	6.6	6.5
91 dBA	1.9	6.9	6.0	5.9	7.0	6.5	9.3	7.8	8.1	8.8
6 kHz										
82 dBA	4.1	10.7	0.7	3.2	4.1	9.3	6.9	4.4	2.3	3.3
85 dBA	1.0	1.3	-0.3	-0.3	1.3	2.0	-0.3	2.1	-0.7	-1.3
88 dBA	1.3	1.8	9.1	2.0	1.7	-1.5	0.6	2.0	3.5	0.2
91 dBA	2.9	0.6	1.6	0.3	-2.4	2.2	-0.7	2.9	-0.7	2.1